



DIPLOMARBEIT

Herr
Sanel Karahmet

**Leitfaden zur ökonomisch und
technologisch vertretbaren
Entscheidung zum Einsatz von
Ersatzbrennstoffen in der
Zementindustrie**

2016

DIPLOMARBEIT

Leitfaden zur ökonomisch und technologisch vertretbaren Entscheidung zum Einsatz von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie

Autor:

Ing. Sanel Karahmet

Studiengang:

Wirtschaftsingenieurwesen

Seminargruppe:

WI Ferlach 13

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. oec. Johannes N. Stelling

Zweitprüfer:

DI Wolfgang Freimann

Mittweida, Jänner 2016

Bibliografische Angaben

Karahmet, Sanel:

Leitfaden zur ökonomisch und technologisch vertretbaren Entscheidung zum Einsatz von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie

Weiz, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen

Diplomarbeit, 2016

Danksagung

Bei dieser Gelegenheit möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich im Zuge dieser Ausbildung, direkt oder indirekt, unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Partnerin, Frau MMag. Jutta Ebner, mit deren Unterstützung ich zusätzlich ermutigt wurde, mit dieser Ausbildung zu beginnen. Während der Studienzeit war sie immer für mich da und gab mir immer den nötigen Rückhalt in allen Belangen, sei es privat oder im Bereich des Studiums.

Ich danke auch meinen Eltern, Fehima und Hazim Karahmet, die mich ebenso zum Studieren motiviert haben. Sie haben mich stets auf die Wichtigkeit einer akademischen Weiterbildung hingewiesen und diese positive Prägung an mich weitergegeben.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Firma ATEC Production & Services für die finanzielle Unterstützung wie auch das Entgegenkommen meiner Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mir, besonders an den Prüfungsterminen, die nötige Rückendeckung gegeben haben.

Schlussendlich möchte meinen herzlichen Dank an Herrn Prof. Dr. Johannes Stelling sowie an Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Freimann für die Betreuung dieser Diplomarbeit aussprechen.

Kurzfassung

In meiner langjährigen beruflichen Tätigkeit beschäftigte ich mich in letzter Zeit in zunehmendem Ausmaß mit dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie. Als Angestellter eines Unternehmens, welches verfahrenstechnische und konstruktive Projektlösungen anbietet, bin ich in der Vergangenheit oft mit der Frage konfrontiert gewesen, aussagekräftigere Aufstellungen der Investitionskosten und dem zu erwartenden Nutzen auf diesem Gebiet aufzustellen.

Mein berufliches Arbeitsfeld hat sich in den letzten Jahren laufend verändert: während früher die Konstruktion neuer oder der Umbau bestehender Produktionsanlagen in meinem Arbeitsumfeld zum Alltag zählten, ist das Thema „Energieeffizienz“ und „Einsparung der Brennstoffkosten“ heute in immer höherem Ausmaß präsent, da die Brennstoffkosten einen wesentlichen Anteil in der Zementproduktion aufweisen. Durch die Substitution traditioneller Energieträger (wie z.B. Kohle oder Öl) können enorme Kostenreduktionen und dadurch eine nicht unwesentliche Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit erreicht werden.

In der heutigen Zeit ist für den Zementhersteller die Sicherung der Wettbewerbsposition der ausschlaggebende Grund für eine potentielle und sehr oft kostenintensive Investition. Um ihn dazu zu bewegen und ihn davon zu überzeugen, dass eine mittelfristige Kosteneinsparung durchaus möglich ist, werden Projektierungsunternehmen aufgefordert, einen erkennbaren Nutzen daraus darzulegen. Diese Anforderung, aber auch das Potential, Ersatzbrennstoffe in weniger industrialisierten Ländern zu forcieren, sind die Beweggründe dieser Arbeit.

Im theoretischen Teil der Arbeit beschreibe ich die positive Entwicklung des Ersatzbrennstoffeinsatzes der letzten Jahre. Hier werden unter anderem Vorteile und Einschränkungen, rechtliche Rahmenbedingungen sowie die Qualitätskriterien in seiner Herstellung und Anwendung näher beschrieben.

Als positive Beispiele dafür nenne ich Erfahrungsberichte aus Österreich und Deutschland, wo die thermische Substitutionsrate in Zementwerken bereits über 60% beträgt. Andererseits wird am Fallbeispiel einiger Westbalkanländer der immer noch große Nachholbedarf erwähnt.

Der immer mehr in den Vordergrund rückende Umweltschutz wird hier sowohl aus der Sicht der Hersteller als auch aus volkswirtschaftlicher Sicht näher betrachtet.

Die meisten Länder sind mit zunehmender Müllbeseitigung konfrontiert, was Veränderungen und Innovationen auf diesem Gebiet erfordert.

Eine allgemeine Darstellung der Vorbedingungen für einen sinnvollen Ersatzbrennstoff-Einsatz, der maximalen Höhe der möglichen Substitutionsraten sowie der technologischen Limits sind ebenso einige der behandelten Inhalte dieser Arbeit.

Im praktischen Teil der Arbeit fließen alle dargestellten Bedingungen, technischen Limitierungen und die dazugehörigen wirtschaftlichen Eingangsgrößen in eine Entscheidungsmatrix, mit der Investitionsentscheidung mittels Hurwicz-Regel angestrebt wird. Eine mathematisch zu erstellende Entscheidungsfindung für eine potentielle Investition, unter Berücksichtigung von diversen Faktoren, erscheint mir hier als sinnvoller Lösungsansatz für dieses Ziel zu sein.

Den Vorbedingungen für Entscheidung der Höhe des Ersatzbrennstoff-Einsatzes, beispielsweise durch seine Verfügbarkeit, Qualität, Transportkosten und Umweltemissionen, folgt eine dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung.

Abschließend fasse ich die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und gebe einen Ausblick in die künftigen Trends in der Abfall- und Energiepolitik.

Die vorliegende Arbeit hat letztendlich zum Ziel, einen zusammenfassenden Arbeitskatalog über die notwendigen Schritte und Maßnahmen sowie deren Nutzen in der Ersatzbrennstoff-Anwendung zu geben. Außerdem soll sie in meinem weiteren Berufsleben sowohl theoretisch als auch praktisch unterstützend wirken.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Methodische Vorgehensweise	4
2 Herkunft und Definition der großen Abfallfraktionen	5
2.1 Siedlungsabfälle	5
2.2 Haushaltsabfälle	9
2.3 Industrieabfälle	9
2.4 Kunststoffabfälle	10
2.5 Mischabfälle (Deponieabfälle)	10
3 Abfallwirtschaftliche Aspekte	13
3.1 Ermittlung der erforderlichen Informationen über den Abfall	13
3.2 Standortfrage	17
3.3 Verfügbarkeit	17
3.4 Abfallanlieferung	18
3.5 Externe Abfallvorbehandlung	20
4 Technologische Aspekte	22
4.1 Übernahme der Abfälle	22
4.2 Aufbereitung	23
4.3 Lagerung	24
4.4 Abfallbeschickung	25
4.5 Verbrennungsprozess	26
5 Rechtliche Rahmenbedingungen für Abfallverwertung	28
5.1 Rahmenbedingungen auf EU-Ebene	28
5.1.1 Richtlinie 2000/76/EG	28
5.1.2 Richtlinie 2008/1/EG (IVU-Richtlinie)	28
5.2 Nationale Rahmenbedingungen (Österreich)	29
5.2.1 Abfallwirtschaftsgesetz 2002	29
5.2.2 Deponieverordnung	29

5.2.3	Abfallverbrennungsverordnung	30
5.2.4	Richtlinie für Ersatzbrennstoffe	30
5.3	<i>Bilaterale Gesetze und Vorgaben</i>	31
5.3.1	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)	31
5.3.2	Emissionsgrenzwerte für Anlagen zur Zementerzeugung	32
6	Hauptprozesse der Zementproduktion	33
6.1	<i>Aufbereitung des Rohmaterials</i>	34
6.2	<i>Pyroprozess / Brennprozess</i>	35
6.2.1	Wärmetauscher	36
6.2.2	Drehrohrofen	37
6.3	<i>Verarbeitung von Klinker, Lagerung und Versand</i>	38
7	Ersatzbrennstoffe in der Zementproduktion	39
7.1	<i>Definition und Normung</i>	40
7.2	<i>Haupteinteilung</i>	43
7.3	<i>Brennstoffanalysen</i>	44
7.4	<i>Bestimmende Faktoren für eine erfolgreiche Anwendung</i>	48
7.4.1	Heizwert	48
7.4.2	Ausreichendes Ausbrennen	49
7.4.3	Umweltemissionen	49
7.4.4	Flüchtige Bestandteile	51
7.4.5	Feuchtigkeit	52
7.4.6	Nebenkomponenten	53
7.5	<i>Maximal mögliche Substitutionsraten</i>	53
7.6	<i>Spezifische Einflussfaktoren auf die Klinkerqualität</i>	54
7.7	<i>Brennstoffabhängige Umweltemissionen</i>	55
7.8	<i>Kontrollmechanismen in der Anwendung</i>	56
7.9	<i>Aktuelle Entwicklungen</i>	57
7.9.1	Länderübergreifende und konzernspezifische Anwendungsvergleiche	57
7.9.2	Erfahrungsbericht Österreich	59
7.9.3	Erfahrungsbericht Deutschland	61
7.9.4	Erfahrungsberichte einiger Westbalkan-Länder	62
7.10	<i>Zusammenfassende Vor- und Nachteile der Anwendung</i>	63
8	Wichtige Kriterien für die Ermittlung einer Investitionsentscheidung	66
8.1	<i>Spezifische Anlageneigenschaften</i>	66
8.2	<i>Ermittlung des geeigneten Ersatzbrennstoffes</i>	66
8.2.1	Vorbedingungen für eine erfolgreiche Selektion	67

8.2.2	Ermittlung des Heizwertes	68
8.3	<i>Eingrenzung des Investitionsaufwands</i>	<i>70</i>
9	Dynamische Berechnung der Investitionswirtschaftlichkeit	71
9.1	<i>Ermittlung der max. Substitutionsrate nach Hurwicz-Regel</i>	<i>71</i>
9.2	<i>Bestimmung der weiteren Eingabedaten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung</i>	<i>75</i>
9.3	<i>Auflistung der zu verwendenden finanzmathematischen Formeln.....</i>	<i>76</i>
9.4	<i>Tabellarische Betrachtung der Wirtschaftlichkeit.....</i>	<i>78</i>
9.5	<i>Tabellarische Betrachtung der wirtschaftlichen Kennzahlen.....</i>	<i>80</i>
10	Fazit	81
10.1	<i>Wichtige technische Erkenntnisse.....</i>	<i>81</i>
10.2	<i>Kritische Betrachtung.....</i>	<i>81</i>
10.3	<i>Künftige Trends</i>	<i>82</i>
	Literaturverzeichnis	84
	Eidesstattliche Erklärung	88

II. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ersatzbrennstoffmengen in der Zementindustrie 2012	2
Abb. 2: RDF aus Siedlungsabfall als Ersatzbrennstoff (eigene Aufnahme)	6
Abb. 3: Manuelle Sortierung des Mischabfalls	11
Abb. 4: Zerkleinerung von Mischabfall vor der Untersuchung (eigene Aufnahmen)	12
Abb. 5: Darstellung einer wilden Deponie neben Gewässer.....	14
Abb. 6: Unkontrollierter Sickerwasseraustritt aus einer Deponie.....	14
Abb. 7: Fragebogen zur Datenerhebung des aktuellen Deponiezustands	16
Abb. 8: Altreifen nach Zerkleinerung (eigene Aufnahme)	17
Abb. 9: EBS-Anlieferung und Abladevorgang mit LKW	18
Abb. 10: EBS-Halle mit gelagerten Ballen und Aufgabeband (eigene Aufnahme)	19
Abb. 11: LKW-Entladung mit Schubboden-System	19
Abb. 12: LKW-Innenraum mit Schubboden als Austragsorgan	19
Abb. 13: Abfallvorbehandlung in einer Recycling-Anlage (eigene Aufnahme)	21
Abb. 14: Abfallsortierung durch Siebtrommel (eigene Aufnahme).....	21
Abb. 15: Metallabscheider oberhalb des Transportbands (eigene Aufnahme)	21
Abb. 16: In Ballen gepresste Plastikflaschen nach Recycling (eigene Aufnahme)	21
Abb. 17: Verwiegung des ankommenden Abfalls auf einer Brückenwaage	22
Abb. 18: EBS-Halle mit Greiferkranverladung (eigene Aufnahme).....	24
Abb. 19: Fließschema der EBS-Förderung zum Wärmetauscher	25
Abb. 20: Fließschema der EBS-Förderung zum Hauptbrenner.....	26
Abb. 21: Bild eines klassischen Zementwerkes aus der Vogelperspektive	33
Abb. 22: Drehrohrofen in einem Zementwerk (eigene Aufnahme)	34
Abb. 23: Wärmetauscher in einem Zementwerk (eigene Aufnahme)	36
Abb. 24: Wärmeübergangsprozess im Wärmetauscher	36
Abb. 25: Größenvergleich Mensch und Drehrohrofen (eigene Aufnahme)	37
Abb. 26: Hauptbrenner – Blick in Richtung Drehrohrofen (eigene Aufnahme)	38
Abb. 27: Ofenbrennerflamme (mit Thermobild-Kamera aufgenommen)	38
Abb. 28: Altreifen auf einer offenen Müllhalde (eigene Aufnahme)	39
Abb. 29: Vorderseite eines Multikanal-Ofenbrenners (eigene Aufnahme)	40
Abb. 30: Hinterseite eines Multikanal-Ofenbrenners (eigene Aufnahme).....	40
Abb. 31: Standorte der Zementwerke in Österreich	59
Abb. 32: Energieträger im Brennstoff-Mix der deutschen Zementwerke in 2014	61
Abb. 33: Ansatzbildung in Abhängigkeit vom Verhältnis Chlor/Schwefel im Heißmehl	67
Abb. 34: Auswirkung der Korngröße auf die Brenndauer	68

III. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Typische Zusammensetzung des Siedlungsabfall-Gemischs	7
Tab. 2: Vergleich zwischen unaufbereitetem und aufbereitetem Siedlungsabfall	8
Tab. 3: Vergleiche der saisonalen Sortiererergebnisse 2008 in Limassol (Zypern)	11
Tab. 4: Einteilung der Schadstoffe in Hauptgruppen	32
Tab. 5: Emissionsgrenzwerte für Ofenlagen zur Zementklinkererzeugung	32
Tab. 6: Einteilung der Energieträger nach Aggregatzustand	43
Tab. 7: Wichtige Geräte für die Brennstoffanalyse	45
Tab. 8: Analysen einiger wichtiger Ersatzbrennstoff-Typen	46
Tab. 9: Unterschied zwischen oberem und unterem Heizwert	47
Tab. 10: Emissionsgrenzwerte für Anlagen zur Zementerzeugung in der EU	50
Tab. 11: Maximale theoretische und praktische Substitutionsraten	53
Tab. 12: Spezifische Einflussfaktoren auf die Klinkerqualität und Gegenmaßnahmen	54
Tab. 13: Verringerung der CO ₂ -Emissionen durch Ersatzbrennstoffe versus Kohle	55
Tab. 14: Kontrollmessungen zur Überwachung der Prozessstabilität	56
Tab. 15: Thermischer EBS-Gesamtenergieeinsatz einiger Industriestaaten	57
Tab. 16: Ersatzbrennstoffanteile bei fünf weltführenden Zementherstellern	58
Tab. 17: Anwendungsauswirkungen diverser Ersatzbrennstoffe versus Kohle	64
Tab. 18: Heizwert-, Asche- und Elementaranalyse wichtigster Ersatzbrennstoffe	69

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Zementproduktion ist ein sehr energieintensiver Prozess, bei dem 30 bis 40% der gesamten Herstellkosten Energiekosten betragen. Die Verringerung des Energieverbrauchs und die Steigerung der Energieeffizienz erlangen in der Zementindustrie daher zunehmend einen immer höheren Stellenwert¹.

Seit der Ölkrise in den 1970er Jahren haben die meisten Zementhersteller mehrere technische Verbesserungen implementiert, um die Brennstoffkosten zu reduzieren. Auch die beiden weltweiten Wirtschaftsrezessionen, die Anfang der 1980er bzw. 1990er Jahre stattfanden, zwangen viele Zementhersteller, umzudenken und ihre Betriebskosten zu senken. Um den eigenen wirtschaftlichen Nutzen zu erreichen, hat man bereits damals die Ersatzbrennstoffe (EBS) als sehr attraktiv betrachtet. So begann man in den 1990er Jahren mit einer ganzen Reihe von Versuchen, Abfälle in den Zementwerken in den USA und Europa zu verbrennen².

Trotz der Tatsache, dass die heutigen Produktionsanlagen deutlich energieeffizienter sind als jene vor 20 oder 30 Jahren, liegt der Energieverbrauch nach wie vor bei etwa 700-800 Kilokalorien pro produziertem Kilogramm Zementklinker (kcal/kg_{Klinker}). Das entspricht, je nach Kohlequalität bzw. ihrem Heizwert, 60 bis 130 kg Kohle pro Tonne hergestelltem Zementklinker³.

Global betrachtet ist der Zementherstellungsprozess nach wie vor von fossilen Brennstoffen, also Öl, Kohle und Gas, abhängig. Jedoch wurde im letzten Jahrzehnt der Einsatz von Alternativbrennstoffen als Ersatz für fossile Brennstoffe deutlich erhöht, um den wirtschaftlichsten und umweltfreundlichsten Energieträgermix zu erreichen. Dieser Anstieg nahm am deutlichsten in den westlichen Industrieländern zu, während die Entwicklungsländer diese Möglichkeiten aufgrund der fehlenden Infrastruktur (z.B. durch getrennte Sammlung) und mangelnden Subventionierungsmaßnahmen noch immer nicht besitzen.

¹ Vgl. VÖZ: Zement trägt Verantwortung : Nachhaltigkeitsbericht 2014, S. 15

² Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 85

³ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 1

Seit Anfang der 1990er Jahre verzeichnet auch die österreichische Zementindustrie einen enormen und konstanten Fortschritt in der Optimierung des thermischen Energieeinsatzes durch den Ersatz fossiler Energieträger. Heute werden zirka 75% des thermischen Energiebedarfs mit Abfallbrennstoffen aus der Region gedeckt. Mit diesem hohen Anteil macht sich Österreich nicht nur von teuren Importen fossiler Energieträger unabhängig, sondern leistet auch einen wichtigen volkswirtschaftlichen Beitrag zur Entsorgungssicherheit. Der nachstehende Ländervergleich zeigt anschaulich den Vorsprung der österreichischen Zementindustrie in diesem Sektor:

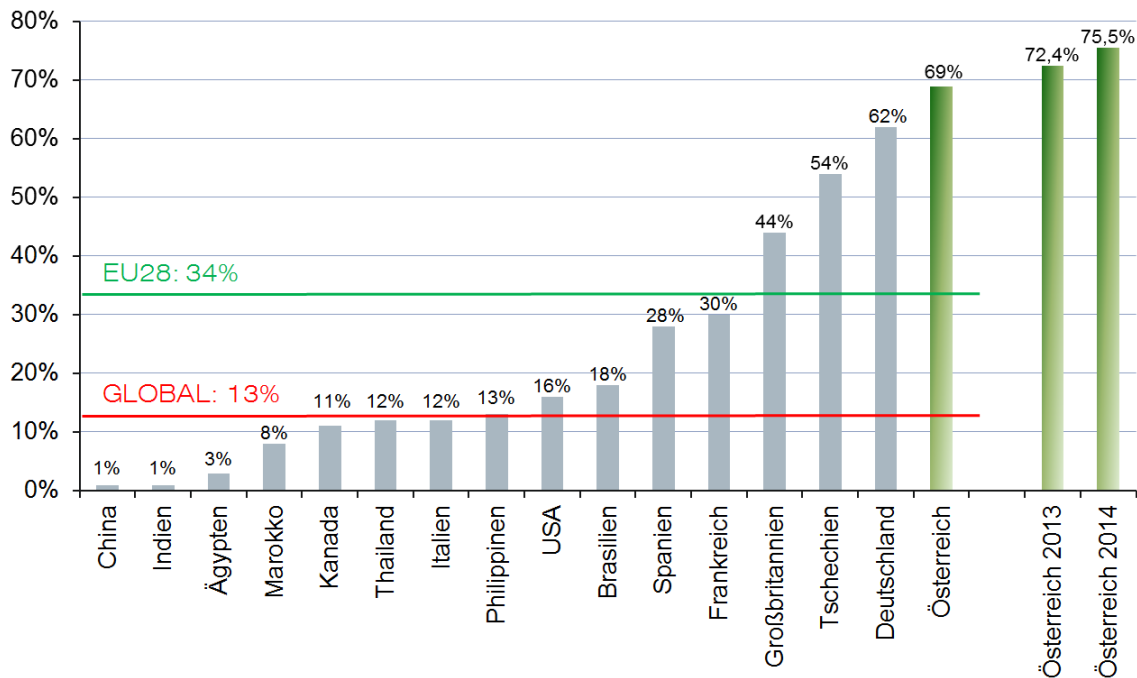


Abb. 1: Ersatzbrennstoffmengen in der Zementindustrie 2012 ⁴

Im letzten Jahrzehnt wurde der deutliche Fortschritt der Nutzung von Ersatzbrennstoffen in der europäischen Zementproduktion mitunter über die EG-Richtlinie 1999/31/EG vorangetrieben. Diese Richtlinie beschreibt ein Verbot der Abfalldeponierung, da die Abfälle als eigentlicher Energieträger genutzt und verbrannt werden können⁵.

Darüber hinaus sind Ersatzbrennstoffe in der Regel billiger als fossile Brennstoffe. Die Zementhersteller in einigen europäischen Ländern, wie zum Beispiel in Österreich und Deutschland, werden sogar bezahlt, um den Abfall zu verbrennen. Der dadurch entstandene „Win-win-Effekt“ zahlt sich für beide Seiten aus: die Zementwerke bekommen einen billigen Brennstoff und der Staat spart sich enorme Geldsummen, um

⁴ Vgl. VÖZ: Zement trägt Verantwortung : Nachhaltigkeitsbericht 2014, S. 15

⁵ Vgl. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>, verfügbar am 02.11.2015

den anfallenden Abfall zu entsorgen. Auch die kostspielige und aufwendige Sanierung alter Deponien aus den 1950er und 1960er Jahren fällt durch dieses Umdenken weg.

Der steigende EBS-Einsatz konfrontiert die heutigen Zementhersteller mit einigen neuen Herausforderungen, wie zum Beispiel:

- Umbau der bestehenden oder Konzipierung neuer Anlagen, um einen optimalen Brennmechanismus zu erzielen
- Aufbereitung, Transport, Lagerung und Dosierung der Ersatzbrennstoffe
- Auswirkungen der Verbrennung auf die Zementqualität
- Einflüsse der EBS-Verbrennung auf die Betriebsstabilität und Produktion
- potentielle Emissionen der Schadstoffe

Diese und einige weitere Themen werden in dieser Diplomarbeit näher betrachtet.

1.2 Zielsetzung

Abgesehen von der Beschreibung von Technologie und Brennmechanismen der Ersatzbrennstoffe, ist das Ziel dieser Arbeit, anhand von ermittelten Kriterien eine entsprechende Entscheidungsmatrix zusammenzustellen und über diese eine dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung durchzuführen.

Bei meinen Recherchen stütze ich mich sowohl auf meine persönlichen Erfahrungen als auch auf wissenschaftliche Fachliteratur. Folgende relevante Themenbereiche werden behandelt:

- Anwendbarkeit bestimmter Brennstoffgruppen nach ihrer physikalischen und chemischen Zusammensetzung
- Bestimmung der maximalen Substitutionsrate für den gewählten Brennstoff
- Reduktion der Umweltemissionen
- Aufrechterhaltung der stabilen Verhältnisse durch vermehrten EBS-Einsatz

Insbesondere sollen in dieser Arbeit die in diversen praktischen Tests nachgewiesenen umwelttechnischen Vorteile der EBS-Anwendung hervorgehoben werden:

- Verringerung des klimarelevanten Ausstoßes von Kohlendioxid (CO_2)
- Möglichkeit der Zerstörung organischer Verbindungen durch die hohen Verbrennungstemperaturen (bis zu 2000°C) im Drehrohren⁶

Letztendlich ist die Verbrennung des aufbereiteten Abfalls die kostengünstigere und nützlichere Alternative zur Mülldeponie.

⁶ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 1-4

Durch die Abfallverbrennung bzw. durch den Verzicht auf die fossilen Energieträger werden zudem die natürlichen Ressourcen und die Umwelt geschont.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Bezugnehmend auf die Ermittlung der maximalmöglichen EBS-Einsatzmenge werden in dieser Diplomarbeit die derzeit meistverwendeten Ersatzbrennstoffe in der Zementherstellung diskutiert. Diesbezüglich werden kritische Betrachtungen und Analysen ihrer Qualitäten, Heizwerte, Vor- und Nachteile, rechtliche Rahmenbedingungen sowie mögliche Umweltauswirkungen wiedergegeben.

Das Kapitel „Hauptprozesse der Zementproduktion“ beschäftigt sich mit der Beschreibung des modernen Herstellungsprozesses mit dem besonderen Augenmerk auf den Brennprozess, da die Ersatzbrennstoffe ausschließlich hier dosiert und verbrannt werden.

Der Abschnitt „Ersatzbrennstoffe in der Zementproduktion“ gibt einen aktuellen und umfassenden Einblick in die geeigneten Anwendungspraktiken und Verbrennungseigenschaften. Er beschreibt außerdem die bestimmenden Faktoren, welche für eine erfolgreiche EBS-Anwendung von Bedeutung sind, um eine adäquate Betriebsstabilität und Zementqualität zu gewährleisten.

Für die Durchführung einer aussagekräftigen technologischen und ökonomischen EBS-Bewertung ist es unter anderem wichtig, entsprechende Einflussfaktoren vorab zu identifizieren, wie zum Beispiel:

- Art des aufbereiteten Abfalls
- Physische und chemische Zusammensetzung des Abfalls
- Qualität (Heizwert und Reinheit) des aufbereiteten Abfalls
- Langfristige Verfügbarkeit der gelieferten Abfallmengen als Brennstoff
- Wirtschaftliche Faktoren (z.B. Zukaufs-, Aufbereitungs- und Transportkosten)

Die wichtigsten Faktoren werden in diesem Zusammenhang in einer Entscheidungsmatrix gegenübergestellt und subjektiv ausgewertet. Zur Einschätzung der maximalen EBS-Substitutionsrate habe ich mich für die Anwendung der in der Planungs- und Entscheidungshilfe bekannten Hurwicz-Regel entschieden⁷.

⁷ Vgl. Stelling: Vorlesungsskript Planungs- und Entscheidungsmethoden, S.99

Durch die Hurwicz-Regel, die als „Umweltsituation unter Ungewissheit“ bezeichnet wird, werden aus meiner Sicht sowohl die Risikominimierung (Überschreitung der unnötigen Investitionshöhe) als auch das Maximum einsetzender EBS-Menge berücksichtigt. Aus meiner Sicht hat diese Entscheidungsregel letztendlich die Aufgabe, zur Eingrenzung des Investitionsaufwands bei entsprechender Entscheidungsfindung zu führen.

Es ist dabei wichtig zu erwähnen, dass die aus der Entscheidungsregel ermittelten Ergebnisse fallweise voneinander abweichen können, da die spezifischen Produktionseigenschaften sowie die prioritäreren Gewichtungen unterschiedlich betrachtet werden können.

Die letztendliche wirtschaftliche Rechtfertigung zur Investition wird in einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung, unter Berücksichtigung der bestehenden Produktionskennzahlen, überprüft. Diesbezüglich werden die wirtschaftlichen Parameter wie Amortisationszeit, Wirtschaftlichkeit und Rentabilität in gesonderter Form ausgewiesen.

2 Herkunft und Definition der großen Abfallfraktionen

2.1 Siedlungsabfälle

In Abhängigkeit dessen, wie eine lokale Kommunalverwaltung organisiert ist, beinhalten die Siedlungsabfälle zum größten Teil den gemischten Wohn- und Gewerbemüll. Beim „*Gewerbemüll*“ handelt es sich um die sogenannten nichtgefährlichen Abfälle, die beispielsweise in Einkaufszentren, Supermärkten oder Bürogebäuden entstehen. Wenn solche Abfälle aus einer getrennten Sammlung stammen, werden sie auch oft an die Recyclingfirmen verkauft.

Der Begriff „*Siedlungsabfall*“ wird in jeder kommunalen Verwaltungsebene eigens definiert und ist lediglich von den internen Vorschriften und Sammelpraktiken innerhalb des bestimmten Gebiets abhängig.

In der Regel sind für die Sammlung und Entsorgung von Abfällen in Wohngebieten die Gemeinden verantwortlich, während für die anderen Sektoren (Handel, Industrie und Landwirtschaft) eigene Regulierungen getroffen werden können.

Die Entsorgung dieser Abfälle auf die Deponien oder zu den Verbrennungsanlagen wird oft von den Unternehmen selbst organisiert, welche die dafür notwendige Berechtigung besitzen und entsprechende Entsorgungsgebühren bezahlen müssen⁸.

Siedlungsabfälle sind in ihrer Zusammensetzung oft variabel und verschieden, da die Entsorgungsaktivitäten auch nicht immer die gleichen Konditionen aufweisen. Ihre physikalischen oder chemischen Eigenschaften können daher nicht zuverlässig bestimmt werden. Trotz dieses Nachteils werden sie aufgrund ihrer reichlichen Verfügbarkeit in der Zementindustrie oft verwendet. Der daraus hergestellte Ersatzbrennstoff, international bekannt als „RDF“ (englische Abkürzung für *Refuse Derived Fuel*), zeichnet sich vor allem durch seinen hohen Heizwert und geringen Feuchtigkeitsgehalt aus. Seit den 1980er Jahren wird an diesem Brennstoff beachtlich geforscht und an seiner Herstellung weiterentwickelt. Somit hat seine Verwendung als praktikable Option gegenüber der Kohle als Traditionsbrennstoff an zunehmender Bedeutung gewonnen.

Aber nicht nur der wirtschaftliche Nutzen macht diesen Abfall attraktiv, sondern auch die Tatsache, dass die durch die steigende Weltbevölkerung überschüssigen Mengen an Siedlungsabfall zu einem immer größer werdenden Umweltproblem werden.



Abb. 2: RDF aus Siedlungsabfall als Ersatzbrennstoff (eigene Aufnahme)

Ein weiterer Vorteil der Verwertung des RDF in den Zementöfen liegt bei der beinahe vollständigen Zersetzung von Toxinen (giftigen Substanzen) und Schwermetallen im Brennprozess, die im Falle einer Deponierung in den Boden durchsickern könnten.

Der unaufbereitete Siedlungsabfall beinhaltet verschiedene brennbare Komponenten, unter anderem Kunststoff, Papier, Gummi, Holz oder Textil.

⁸ Vgl. Lechtenberg, Diller: *Alternative Fuels and Raw Materials*, S. 65

Die folgende Tabelle zeigt seine, auf Gewichts- und Volumenanteil, typische Zusammensetzung⁹:

Material	Gewichtsanteil [%]	Volumenanteil [%]
Zellstoff, Karton und Pappe	37,5	37
Glas	6,7	2,3
Eisenmetalle	6,3	8,8
Aluminium	1,4	3,1
Kunststoff	8,3	18,3
Gummi und Leder	2,4	5,8
Textil	2,8	5,4
Holz	6,3	5,9
Nahrungsmittelabfälle	6,7	2,7
Gartenabfälle	17,9	9,2
Andere	3,7	1,5

Tab. 1: Typische Zusammensetzung des Siedlungsabfall-Gemischs

Ein weiterer Grund für die Verwendung von Siedlungsabfällen in der Zementindustrie ist die Vermeidung der Abfalldeponierung. Sofern die Abfälle nicht entsprechend aufbereitet werden, sind der variierende Heizwert und der relativ hohe Feuchtigkeitsgehalt jedoch als Nachteil zu betrachten. Der aus dem Siedlungsabfall gewonnene Brennstoff durchläuft eine Reihe verschiedener Abläufe:

- Trennung durch getrennte Sammlung
- Sortierung durch mechanische Trennung
- Zerkleinerung (Schreddern oder Mahlen)
- Sieben
- Durchmischung
- Trocknung und Palettierung
- Lagerung

Durch die Trennung wiederverwertbarer Fraktionen bzw. Recycling werden sowohl Metalle oder Glas, als auch die biologisch abbaubaren Elemente (Lebensmittelreste, Gartenabfälle) aussortiert. Erst danach durchläuft der Abfall die oben genannten Verarbeitungsprozesse, um den gewünschten Brennstoff herzustellen.

⁹ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 89-90

Der unaufbereitete Siedlungsabfall (inkl. Feuchte) hat beispielsweise einen typischen Heizwert von 8 bis 11 Megajoule pro Kilogramm (MJ/kg), während der Heizwert eines hergestellten RDF im Bereich von 15 bis 20 MJ/kg ist.

Eine typische chemische Gegenüberstellung in der Zusammensetzung zwischen dem unaufbereiteten Siedlungsabfall und dem aufbereiteten RDF, wird in der folgenden Tabelle dargestellt:

Komponente	Siedlungsabfall [%]	RDF [%]
Kohlenstoff	34,88	47,1
Wasserstoff	4,65	7,1
Stickstoff	1,02	0,7
Schwefel	0,15	0,24
Chlor	1,02	0,6
Sauerstoff	23,11	29,4
Feuchte	31,2	15
Flüchtige Bestandteile	64,83	82,06
Asche	35,17	10,9
Heizwert	15,4 MJ/kg (\approx 3600 kcal/kg)	21,2 MJ/kg (\approx 5000 [kcal/kg])

Tab. 2: Vergleich zwischen unaufbereitetem und aufbereitetem Siedlungsabfall¹⁰

Je nach chemischer Zusammensetzung kann die Verbrennung von Siedlungsabfällen eine verhältnismäßig höhere Emission gasförmiger Schadstoffe wie Schwefel (SO_x) oder Chlor (HCl) verursachen. Jedoch wird diese Schadstoff-Bildung aufgrund der alkalischen Atmosphäre (alkalisch = Bindungsvermögen) des Drehrohrofens vorwiegend im Produkt eingebunden.

Im Vergleich zur Verbrennung fossiler Brennstoffe bewirkt diese Art der Mitverbrennung eine Reduktion der CO_2 -Emissionen. Durch die Senkung der Brennerflammentemperatur können auch die Emissionen der schädlichen Stickstoffoxide (NO_x) reduziert werden. Somit bewirkt die Substitution des Siedlungsabfalls einen positiven Effekt auf die Umwelt gegenüber den fossilen Brennstoffen.

¹⁰ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 90

2.2 Haushaltsabfälle

Haushaltsabfälle, die in den Ein- oder Mehrfamilienhäusern anfallen, enthalten verschiedene Fraktionen, die unter anderem oft Kunststoffabfälle beinhalten. In der Regel ist die Gemeinde für die Sammlung und den Transport dieser Abfälle zuständig. In einigen westlichen Industrieländern, bei denen das umwelttechnische Bewusstsein stark ausgeprägt ist (Beispiel: Österreich, Deutschland), ist eine eigeninitiierte Trennung der wiederverwertbaren Abfälle seitens der Bevölkerung eine Selbstverständlichkeit. Nur der übriggebliebene Restmüll wird von den konzessionierten Unternehmen zur Entsorgung abgeholt.

Um eine Recycling- bzw. Produktionsanlage zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen aus dem Siedlungsabfall konzipieren zu können, ist es wichtig, aus dem jeweiligen Regulierungssystem kontinuierliche Daten und Informationen über die einzelnen getrennten Abfallmengen zu erhalten¹¹.

2.3 Industrieabfälle

Industrieabfälle werden in „gefährliche“ und „ungefährliche“ Industrieabfälle eingeteilt und entsorgungstechnisch in der Regel nicht als Siedlungsabfälle behandelt. In der Praxis kommt es jedoch vor, dass die ungefährlichen Abfälle in manchen Gebieten von den kommunalen Entsorgungsbetrieben gebührenpflichtig eingesammelt und an die Recycling-Betriebe weiterverkauft werden.

Eine gezielte Suche nach Arten und Mengen der Abfälle ist für international tätige Unternehmen leicht möglich, da in allen Niederlassungen die gleichen Abfallarten anfallen. Folgende Unternehmen aus dem Konsumgütersektor können unter anderem an dieser Stelle genannt werden:

- Tetra Pak (Getränkeverpackungen)
- Procter & Gamble („Pampers“-Windel und andere vergleichbare Produkte)
- Johnson & Johnson (Hygieneartikeln)¹²

Eine ordnungsgemäße und standardisierte Abfalltrennung findet an allen Standorten dieser Konzerne statt. Ihre spätere thermische Verwertung in der Zementindustrie ist für solche Abfallarten keine Seltenheit.

¹¹ Vgl. Lechtenberg, Diller: Alternative Fuels and Raw Materials, S. 65

¹² Vgl. Ebenda, S. 66

2.4 Kunststoffabfälle

Kunststoffabfälle sind aufgrund ihrer großen weltweiten Produktion für die Zementindustrie sehr leicht zugänglich. Diese Abfälle sind meistens in den Siedlungs- und Industrieabfällen vorhanden und aufgrund ihres hohen Heizwertes am Brennstoffmarkt besonders gefragt. Diverse praktische Untersuchungen und Berechnungen berichten über die positiven umwelttechnischen Effekte ihrer Mitverbrennung. Beispielsweise zeigt sich, dass die Verbrennung von Kunststofftypen Polyethylen und Polystyrol in den Zementöfen zur Reduktion der CO₂-Emissionen führt. Abgesehen von diesen positiven Effekten wurden auch weitere positive Umwelteigenschaften nachgewiesen, wie beispielsweise Schutz und Nachbildung der Ozonschicht oder Verhinderung der Entstehung von sauren Regen durch die Reduktion des Schwefeldioxid-Ausstoßes (SO₂)¹³.

Andererseits gibt es in der Mitverbrennung der Kunststoffe auch Problematiken aufgrund ihres relativ hohen Chlorgehalts, welches meistens in den PVC-Produkten zu finden ist.

Aus diesem Grund sind regelmäßige Kontrollen der chemischen Zusammensetzungen notwendig, um in der Praxis festgelegte Obergrenzen des Chlorgehalts nicht zu überschreiten. Ein höherer Chlorgehalt kann sich negativ auf die Klinkerqualität auswirken und zu Prozessinstabilitäten führen. In manchen Fällen sind auch weitere Investitionen notwendig, beispielsweise die Installation einer Chlor-Bypass-Anlage zur Eliminierung des überschüssigen verdampften Chlors aus dem Ofenabgas.

2.5 Mischabfälle (Deponieabfälle)

Bei diesen Abfällen ist es erfahrungsgemäß oft schwierig, ihre Qualitäten im Voraus zu bestimmen, weil es zwischen den offiziellen Abfallstatistiken einer Region und den tatsächlich zur Verfügung stehenden Abfallarten zu erheblichen Unterschieden kommen kann. Daher ist es oft notwendig, periodische Abfallanalysen durchzuführen.

Viele Länder verfügen häufig über keine passenden Lieferfahrzeuge mit angebrachter Wiegetechnik oder Wiegebrücken, mit denen ein langfristiges Monitoring ermöglicht werden kann. Somit können die Mengen lediglich auf das beförderte Volumen und durchschnittliche Schüttgewicht geschätzt werden.

¹³ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 92

Die Abfallzusammensetzung und seine Mengen unterliegen in manchen Regionen starken saisonalen Schwankungen. Das beste Beispiel dafür liefern Fremdenverkehrsregionen, wo in Ferienmonaten bis zur doppelten Abfallmenge, gegenüber dem Rest des Jahres, anfallen kann:

Art des Abfalls	Sommer	Winter	Verwendbare Fraktionen für Ersatzbrennstoff (RDF)
	Volumen [%]		
Kunststoff	23	14	JA
Papier und Karton	27	18	JA
Holz	1	3	JA
Textilien	2	6	JA
Metalle	2	3	NEIN
Glas	6	4	NEIN
Biogene- bzw. Gartenabfälle	25	35	NEIN
Minerale und Feinanteile	14	17	NEIN
Gesamt:	100	100	

Tab. 3: Vergleiche der saisonalen Sortiierungsergebnisse 2008 in Limassol (Zypern)¹⁴

Um repräsentative Analysedaten durchzuführen, ist es auch wichtig, bestimmte Zeiten für die Probeanalysen festzulegen, da die Müllabholungen nur an gewissen Tagen und zu bestimmten Uhrzeiten stattfinden. Eine Probeanalyse wird entweder bei der Eingangskontrolle zur Deponie (oder Recyclinganlage) oder über die vordefinierten Stichproben durchgeführt. Solche Stichproben werden beispielsweise durch eine Abfallprobe von 1 m³ entnommen und untersucht.

Die Proben werden zuerst manuell in „verwendbare“ und „nichtverwendbare“ RDF-Fraktionen getrennt. Diese Fraktionen sind beispielsweise Kunststoff, Papier bzw. Karton, Holz, Textilien, Metalle, Glas, Gartenabfälle usw.



Abb. 3: Manuelle Sortierung des Mischabfalls¹⁵

¹⁴ Vgl. Lechtenberg, Diller: Alternative Fuels and Raw Materials, S. 65 f.

Bei jeder Stichprobenuntersuchung werden, abgesehen von Gewicht und Volumen der verwendbaren RDF-Fractionen, weitere Daten in der Laboranalyse ermittelt. Die wichtigsten sind:

- Feuchtigkeit (%)
- Chlor- und Schwefelgehalt (%)
- Heizwert (MJ/kg oder kcal/kg)
- Aschegehalt (%)



Abb. 4: Zerkleinerung von Mischabfall vor der Untersuchung (eigene Aufnahmen)

¹⁵ Vgl. <http://www.kab.co.at/module/helper/downloads/downloads/46.jpg>, verfügbar am 21.12.2015

3 Abfallwirtschaftliche Aspekte

3.1 Ermittlung der erforderlichen Informationen über den Abfall

Neben den erwähnten Sammel- und Entsorgungstechniken ist es genauso wichtig, über die lokalen Regelungen Bescheid zu wissen, welche die weitere Vorgangsweise in der Abfallbehandlung beeinflussen können. Zum Beispiel regelt die österreichische Gesetzgebung die Deponierung der Abfälle auf diese Weise, dass die *Abfallbesitzer* grundlegende Informationen über den Abfall in einer *Abfallinformation* beschreiben müssen. In Abhängigkeit dessen, welche Mengen, Arten oder Anfallshäufigkeiten (Regelmäßigkeit) auftreten, müssen unter Umständen mehrere solche Abfallinformationen ausgestellt werden¹⁶.

Abfallinformationen, die an die zuständigen Behörden übermittelt werden, sind für jene Abfälle von Bedeutung, die vor ihrer Deponierung durch eine befugte Fachperson oder Fachanstalt grundlegend charakterisiert werden müssen. Dabei sind die relevantesten Eigenschaften für eine dauerhafte Ablagerung zu ermitteln und zu dokumentieren. Diesbezüglich ist die chemische Untersuchung das wichtigste Dokument.

Weiters müssen die Abfallbesitzer grundlegende Informationen des untersuchten Abfalls an einen befugten Gutachter übermitteln und unter anderem folgendes umfassen:

- Abfallbesitzer (z.B. Name des Entsorgungsunternehmens)
- Abfallerzeuger (z.B. Name eines Industriebetriebes)
- Art des Abfalls
- Anfalls- und Herkunftsort (siehe Abfallerzeuger)
- Grundlegende physikalische Abfalleigenschaften des Abfalls
- Masse des Abfalls

Bei der Anlieferung des Abfalles an eine Deponie muss der Abfallbesitzer auch dem Deponieinhaber mit der ersten Abfallanlieferung eine Abfallinformation übermitteln. In manchen Fällen (z.B. Kleinmenge eines nicht verunreinigten Bodenaushubmaterials, bestimmte Baureste usw.) ist keine fachliche Untersuchung notwendig – hier ist eine Abfallinformation bei der ersten vergleichbaren Anlieferung ausreichend.

¹⁶ Vgl. https://www.usp.gv.at/Portal.Node/usp/public/content/umwelt_und_verkehr/pflichten_abfallerzeuger/abfallinformation/36399.html, verfügbar am 10.11.2015

In Bezug auf die Ersatzbrennstoff-Herstellung können solche Abfallinformationen nützlich sein, da die chemischen und physikalischen Basiseigenschaften darin dokumentiert sind. Andererseits können folgende Informationen für den EBS-Produzenten interessant sein, um die langfristige Verfügbarkeit eines bestimmten Abfalls zu überprüfen:

- Behördenpläne inkl. administrativen Grenzen und Deponie-Standort
- Bevölkerungsgröße und -Entwicklungsprognosen
- Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser
- Anzahl und Größe der potentiellen Industrie- und Handelsbetriebe als Abfalllieferanten
- Andere relevanten Vorschriften zur Entsorgung feste und flüssiger Abfälle¹⁷.

Viele Zementwerke, insbesondere jene der Entwicklungs- und Schwellenländer, besitzen oft keine oder nur geringe Erfahrung auf dem Gebiet der Abfallwirtschaft oder Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Genau diese Tatsache kann bei einer späteren Anwendung bzw. Mitverbrennung zu Problemen führen. Aus diesem Grund müssen entsprechende Vorbereitungen im Vorfeld getroffen werden, bei denen die relevanten Informationen über die Abfallart und –Mengen zur Verfügung gestellt werden. In den Industrieländern wird das weitgehend unproblematisch über den Informationsaustausch mit den zuständigen Behörden abgehandelt. Auch die Informationen über den Ankauf von aufbereiteten Abfällen können von den zertifizierten Fachunternehmen der Entsorgungsbranche eingeholt werden.

Leider verfügen viele Staaten über keine annähernden Entsorgungssysteme, Infrastruktur und Kontrollen, und daher sind solche Analysen dort äußerst schwierig zu bewerkstelligen.



Abb. 5: Darstellung einer wilden Deponie neben Gewässer¹⁸



Abb. 6: Unkontrollierter Sickerwasseraustritt aus einer Deponie¹⁹

¹⁷ Vgl. Lechtenberg, Diller: Alternative Fuels and Raw Materials, S. 66

¹⁸ Vgl. <http://www.vallartadaily.com/leachate-water-puerto-vallarta-landfill-site-treated/>, verfügbar am 23.11.2015

Selbst in manchen europäischen Staaten werden die Abfälle noch heute oft, und unabhängig welcher Art, zur Gänze auf die Deponien geführt²⁰. Viele von diesen Deponien erfüllen nicht einmal die minimalsten Umweltschutzstandards.

Auf diese Weise sickern die kontaminierten gefährlichen Stoffe (Öl, Schwermetalle und andere toxischen Verbindungen) in den Boden und kommen mit dem Grundwasser in Kontakt. Dies verursacht nachhaltige negative Auswirkungen auf die Gesundheit aller Lebewesen und auf die Umwelt im Allgemeinen.

Der heutige Stand der Technik besagt, dass nicht die Verbrennungsanlagen eine umwelttechnische Gefährdung darstellen, sondern die Entsorgung der Siedlungsabfälle auf den Deponien. Dort müssen sie nämlich wiederum sehr lange gelagert und kostenintensiv betreut werden. Viele Deponien müssen nach ihrer Schließung bis zu dreißig Jahre, unter sehr ungünstigen Verhältnissen bis zu hundert Jahre, danach betreut werden. Das kostet Zeit und viel Geld.

Aus diesem Grund geht der Weg der heutigen europäischen Abfallwirtschaft weg von der Deponie, hin zu Recycling und thermischer Verwertung der Abfälle.

Um eine quantifizierbare Aussage über die verfügbaren Abfallarten und Qualitäten zur Ersatzbrennstoffherstellung zu bekommen, können entsprechende Fragebögen an die Deponiebetreiber übermittelt werden, um weitere Berechnungen und Auswertungen vornehmen zu können.

Solche Fragebögen können beispielsweise folgendermaßen aussehen (siehe nächste Seite):

¹⁹ Vgl. <https://environmentalgeography.wordpress.com/2011/08/31/environmental-problem/>, verfügbar am 23.11.2015

²⁰ Vgl. Lechtenberg, Diller: Alternative Fuels and Raw Materials, S. 63

DEPONIE-DATENERHEBUNG																																	
Region:		Land:																															
1. ALLGEMEINE INFORMATIONEN																																	
Deponiebezeichnung:		Betreiber:																															
Straße:		PLZ/Ort:																															
Kontaktperson:		Tel-Nr.:																															
E-Mail:		Fax-Nr.:																															
2. ALLGEMEINE INFORMATIONEN ÜBER DEN AKTUELLEN DEPONIEZUSTAND																																	
Art der Betriebes:		Zustand der Anlage (z.B. diskontinuierlich, unsystematisch, unordentlich)																															
Gesamt-Betriebszeiten	Tage/Jahr	Std./Jahr	Ist Deponie erweiterbar?																														
			JA NEIN																														
Volumen der best. Deponie (m3)		Müll-Tiefe (m)																															
Layouts: <i>bitte beifügen</i>		Deponie-Tiefe (m)																															
Draufsicht, Länge x Breite, Umgebung, Flüsse, Straßen, Zäune																																	
Beschreibung der Sammelfläche: Stadt, Land..usw.		Gesamt-Einwohnerzahl																															
Fläche (km2)		Erwartete Gesamtmenge des zu sammelnden Abfalls in der Umgebung (Jahr)																															
Täglich gelieferte Abfallmenge (Tonnen / Tag)		Gesamtmenge des gesammelten Abfalls (Jahr)																															
Tech. Ausstattung der Deponie <i>Nivellierung, Verdichtung, Drainage</i>		Behandlung der Deponie																															
Sammelsystem: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Fuhrpark</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">Auf Lager</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LKW</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> JA</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> <tr> <td>Transportwagen</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> JA</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> <tr> <td>Kipper</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> JA</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> <tr> <td>Container</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> JA</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> <tr> <td>Andere</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> JA</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> </tbody> </table>		Fuhrpark	Auf Lager		LKW	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN	Transportwagen	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN	Kipper	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN	Container	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN	Andere	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN	Einzugsbereich: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Anzahl der Einheiten</th> <th style="text-align: left;">Volumen (m3)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td></tr> <tr><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td></tr> <tr><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td></tr> <tr><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td></tr> <tr><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td><td><input style="width: 100%;" type="text"/></td></tr> </tbody> </table>		Anzahl der Einheiten	Volumen (m3)	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>
Fuhrpark	Auf Lager																																
LKW	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN																															
Transportwagen	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN																															
Kipper	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN																															
Container	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN																															
Andere	<input type="checkbox"/> JA	<input type="checkbox"/> NEIN																															
Anzahl der Einheiten	Volumen (m3)																																
<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>																																
<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>																																
<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>																																
<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>																																
<input style="width: 100%;" type="text"/>	<input style="width: 100%;" type="text"/>																																
Durchschnittliche Entfernung von Abfallerzeuger zur Deponie (km):		Entfernung der Deponie zum Zementwerk (km):																															
Durchschnittliche Transportkosten von Abfall-Verursacher zur Deponie (EUR):		Durchschnittliche Transportkosten von Deponie zum Zementwerk (EUR):																															
Verbleibende Kapazität der Deponie:		Zufahrtswege / Straßenzustand / (betonierte, asphaltierte oder Schotterstraße)																															
Statistische Daten, Zeichnungen, Layouts (bitte beifügen)		Weitere Informationen:																															
Elektrische Energie:																																	
Frequenz:	Spannung:	KW:																															
3. ABFALLANLIEFERUNG																																	
Art des Abfalls		Menge [Tonnen/Jahr]																															
Siedlungsabfälle:		<input style="width: 100%;" type="text"/>																															
Industrieabfälle:		<input style="width: 100%;" type="text"/>																															
Abfälle aus Krankenhäusern (<i>falls zutrifft</i>):		<input style="width: 100%;" type="text"/>																															
Andere Abfallarten:		<input style="width: 100%;" type="text"/>																															

Abb. 7: Fragebogen zur Datenerhebung des aktuellen Deponiezustands²¹

²¹ Vgl. Lechtenberg, Diller: Alternative Fuels and Raw Materials, S. 323-326

3.2 Standortfrage

Bei der Ausarbeitung eines optimalen Abfallwirtschaftskonzeptes ist die Wahl eines geeigneten Anlagenstandortes zur Abfallverbrennung ausschlaggebend. Die dabei am wichtigsten zu berücksichtigenden Aspekte sind in erster Linie Vermeidung von Schadstoffemissionen und größtmögliche Verwertung des Abfalls.

Hinsichtlich der Abfalllogistik ist vor allem die geographische Nähe zum Ort des Abfallanfalles wichtig, um die Emissionen durch den Transport (z. B. Geruch, Luftschadstoffe) möglichst gering zu halten²². Da die heutigen modernen Zementwerke im weitesten Sinne als Müllverbrennungsanlagen zu verstehen sind, sind diese Gesichtspunkte vor dem Bau neuer Anlagen unbedingt zu berücksichtigen.

3.3 Verfügbarkeit

Der Gewinn von Ersatzbrennstoffen aus Abfall ist im Normalfall fast überall möglich. Jedoch bevorzugen die Zementhersteller zumeist die lokal verfügbaren Quellen, um beispielsweise Transportkosten einzusparen. Andererseits sind die lokalen Kommunen auch bemüht, ihre „eigenen“ Abfälle durch die Verbrennung loszuwerden.

Es gibt aber auch solche Regionen, wo die Menge an zur Verfügung stehenden Ersatzbrennstoffen niedrig ist. Dies hat sehr oft wenig mit der eigentlichen Abfallverfügbarkeit zu tun, sondern eher mit der Tatsache, dass es keine passenden Anlagen zur Abfallaufbereitung bzw. EBS-Herstellung gibt.

In Bezug auf die Verfügbarkeit sind Siedlungsabfälle und Altreifen erfahrungsgemäß eine der besten Optionen für die Zementindustrie. Ihre Aufbereitung und Verarbeitung wächst heutzutage kontinuierlich²³.



Abb. 8: Altreifen nach Zerkleinerung (eigene Aufnahme)

²² Vgl. Böhmer, Kügler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 59

²³ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 95

Auch die Kunststoffabfälle werden heute in großen Mengen verarbeitet. Jedoch ist ihr Einsatz in der Zementindustrie, aufgrund der chlorhaltigen Zusammensetzung, begrenzt.

Eine weitere wachsende Brennstoffalternative ist auch das Tiermehl (Produkt der Tierkörperverwertung), dessen Verfügbarkeitstendenz aufgrund von Nutzungseinschränkungen in anderen Industriesektoren steigend ist. Beispielsweise existieren Verbote für die Weiterverwertung als Viehfutter, da oft Risiken zur Verbreitung von Krankheiten beim Menschen vermutet werden. Erwähnenswert ist auch die landwirtschaftliche Biomasse als potentieller Ersatzbrennstoff, deren Verfügbarkeit jedoch saisonal begrenzt ist, da eine bestimmte Ernte nicht ganzjährig angebaut werden kann²⁴.

3.4 Abfallanlieferung

Die meisten EBS-Anlieferungen erfolgen über die Straße mittels mit Lastkraftwägen (LKW), während der Bahntransport nur teilweise benutzt wird. Bei der LKW-Anlieferung wird der Abfall in regelmäßigen Abständen in das Zementwerk transportiert und in die dafür vorgesehenen Müllbunker oder Silos abgeladen.



Abb. 9: EBS-Anlieferung und Abladevorgang mit LKW ²⁵

Ersatzbrennstoffe werden hauptsächlich lose angeliefert. Je nach Möglichkeit der weiteren innerbetrieblichen Förderung wird der grob aufbereitete Abfall auch oft in Form von gepressten, in Folie umwickelten Ballen, in das Zementwerk gebracht. Erst im Zementwerk werden diese auf die gewünschte Körnung zerkleinert und dem Brennprozess zugeführt.

²⁴ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 95

²⁵ Vgl. Workman: Redler - Schenck Process Group – Fachpräsentation, S. 31



Abb. 10: EBS-Halle mit gelagerten Ballen und Aufgabeband (eigene Aufnahme)

Bei der heutigen modernen LKW-Logistik kommen auch zunehmend die hydraulisch angetriebenen Schubboden-Fördertechniken zum Einsatz. Diese Böden bestehen aus einer Vielzahl einzelner hydraulisch angetriebener Lamellen, die das Fördergut nach Außen führen und austragen. Transportfahrzeuge die über solche Entladesysteme verfügen, können große Mengen an losen, zerkleinerten Ersatzbrennstoffen transportieren und sind für die Be- und Entladung sehr gut geeignet.



Abb. 11: LKW-Entladung mit Schubboden-System²⁶



Abb. 12: LKW-Innenraum mit Schubboden als Austragsorgan²⁷

Im Falle einer Bahnlieferung werden die Brennstoffe (meistens als Ballen) durch Abfallcontainer an Umladestationen auf die Bahn verladen und bei der Ankunft ins Zementwerk an den betriebseigenen Entladestationen entweder automatisch oder mit Hilfe eines LKWs entleert. Eine Anlieferung per Schiff ist grundsätzlich möglich, wird jedoch selten benutzt.

²⁶ Vgl. <http://www.tren-cargo.de/de/infos/schuettgutverkehr-mit-schubboden.html>, verfügbar am 12.11.2015

²⁷ Vgl. <http://www.vollmar-logistik.de/deutsch/286/213/213/998313/design8.html>, verfügbar am 12.11.2015

Unabhängig davon, welche logistische Möglichkeit gewählt wird, sind die jeweiligen Liefermengen und Zeitpunkte immer auf den Prozess abzustimmen, um die Kontinuität der Brennstoffversorgung zu gewährleisten.

Österreich verfügt über eine sehr gut organisierte Entsorgungsinfrastruktur, was unter anderem auch einen wichtigen Grund für die außergewöhnlich hohen Substitutionsraten von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken darstellt.

3.5 Externe Abfallvorbehandlung

Eine sortierte Abfallsammlung ist die Basis für die heutige moderne Abfallwirtschaft. Damit eine aufwändige Abfallvorbehandlung und –Trennung möglichst vermieden werden kann, entscheidet heute die Bevölkerung selbst, wie der Abfall entsorgt wird. Eine ungetrennte Entsorgung in die Restmüllcontainer erschwert die nachträgliche Abfalltrennung enorm.

Da der getrennt gesammelte Abfall am besten verwertbar ist, ist die Rolle des Bürgers in diesem Zusammenhang absolut wichtig. Am Beispiel einer gut funktionierenden Abfallsammlung in Österreich und Deutschland und ihren hohen Recyclingraten können sich heute viele andere Länder messen. Die abfallwirtschaftlichen Unternehmen haben außerdem ihre finanziellen Vorteile in diesem Industriezweig erkannt.

In der Produktion widmet man sich vermehrt der Frage, wieviel mehr aus dem Abfall gewonnen werden kann, anstatt ihn einfach nur zu entsorgen. Die heutige moderne Abfallwirtschaft geht noch einen Schritt weiter, da sie den Abfall zudem als wichtige Energiequelle erkannt hat.

Die Abfallwirtschaft in Österreich wurde in den letzten Jahren maßgeblich von den Vorgaben der nationalen Deponieverordnung geprägt. Durch diese Regelung wird klar definiert, dass nur mehr reaktionsarme Abfälle abgelagert werden dürfen.

Das dabei wesentliche Kriterium ist der Anteil des abbaubaren Kohlenstoffes (maximal fünf Massenprozent) auf einer Abfalldeponie. Um diese Anforderungen zu erfüllen, muss ein Großteil der Siedlungsabfälle vor der Deponierung vorbehandelt werden.

Dafür stehen im Wesentlichen drei Möglichkeiten zur Verfügung²⁸:

- Thermische Verwertung ohne Vorbehandlung und anschließende Entsorgung der Verbrennungsrückstände auf die Deponie
- Mechanische Vorbehandlung in Trennanlagen mit nachfolgender thermischer Verwertung von brennbaren Fraktionen
- Mechanisch-biologische Vorbehandlung in einer MBA (mechanisch-biologische Anlage) mit nachfolgender thermischer Verwertung der heizwertreichen Fraktion und Ablagerung einer Deponiefraktion.

Je nach Qualität und Aufbereitungsanforderung des hereinkommenden Abfalls werden die Aufbereitungsanlagen mit unterschiedlichen maschinellen Vorrichtungen ausgestattet. Diese sind unter anderem Metallabscheidung, Siebtrommeln, Zerkleinerungsmaschinen oder Ballenpressen.



Abb. 13: Abfallvorbehandlung in einer Recycling-Anlage (eigene Aufnahme)



Abb. 14: Abfallsortierung durch Siebtrommel (eigene Aufnahme)

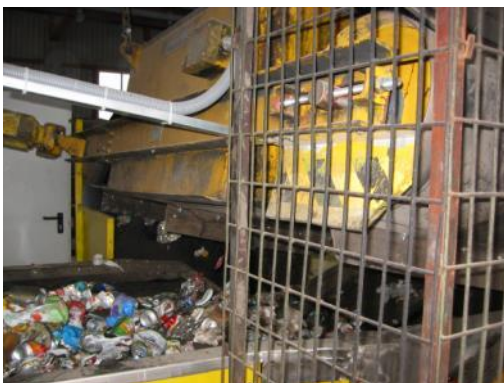


Abb. 15: Metallabscheider oberhalb des Transportbands (eigene Aufnahme)



Abb. 16: In Ballen gepresste Plastikflaschen nach Recycling (eigene Aufnahme)

In Österreich werden die Siedlungsabfälle ausschließlich thermisch verwertet, egal welche der oben genannten Vorbehandlungsmethoden angewendet wird.

²⁸ Vgl. Böhmer, Kügler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 27

Nach der thermischen Verwertung werden die Verbrennungsrückstände auf die Deponie geführt. Dadurch ist es auch in Zukunft nicht möglich, ganz auf die Deponien verzichten, jedoch wird ihre Inanspruchnahme auf ein Minimum reduziert.

4 Technologische Aspekte

4.1 Übernahme der Abfälle

Bei der Ankunft am Betriebsgelände einer Müllverbrennungsanlage oder eines Zementwerkes bzw. nach der Entladung werden die Lieferfahrzeuge üblicherweise auf einer Brückenwaage verwogen, um die angelieferten Abfallmengen auswerten zu können.



Abb. 17: Verwiegung des ankommenden Abfalls auf einer Brückenwaage (eigene Aufnahme)

Manche Produktionsbetriebe verfügen auch über moderne Erfassungssysteme, bei welchen mittels eines am LKW angebrachten Computerchips eine direkte Zuordnung zu einem bestimmten Zulieferer festgelegt werden kann²⁹.

Um eine qualitativ gleichmäßige Belieferung mit Ersatzbrennstoffen zu gewährleisten, werden regelmäßige, werksinterne Sichtkontrollen sowie physikalisch-chemische Laboranalysen durchgeführt. Das besondere Augenmerk liegt dabei auf der Ermittlung des Brennstoffheizwertes, um die energetisch definierten Prozessbedingungen erfüllen zu können. Eine stark variierende Brennstoffqualität wirkt sich negativ auf den Produktionsprozess aus und verursacht unnötige Umstellungen im Anlagenbetrieb.

Die heutigen Zementhersteller haben normalerweise vertraglich festgelegte Vereinbarungen mit ihren Zulieferern, in welchen die Mengen und Qualitäten, aber auch deren Abweichungen genau definiert werden.

²⁹ Vgl. Böhmer, Kügler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 47

4.2 Aufbereitung

Wie bereits erwähnt, werden die Abfälle vor ihrer Anwendung als Ersatzbrennstoff einer mechanischen Aufbereitung unterzogen, um Störstoffe wie Metall, Glas oder organische Substanzen zu entfernen. Auf diese Weise werden hochwertige brennbare Fraktionen gewonnen und anschließend auf die notwendige Korngröße zerkleinert.

Ob die endgültige Zerkleinerung zum Ersatzbrennstoff intern oder extern durchgeführt wird, entscheiden die Zementhersteller hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit selbst. Folgende Kriterien können dabei eine Rolle spielen:

- Besitz einer rechtlichen Genehmigung, selbst die Ersatzbrennstoffe zu produzieren
- maschinelle Ausstattungsgrad des Werkes
- bestehende Automatisierungsgrad des Werkes
- Erfüllung und Konstanz der Qualitätsanforderungen bei eigener maschineller Aufbereitung
- Einkaufskosten des extern aufbereiteten Brennstoffs

Bei der Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen spielt die Korngröße des zerkleinerten Abfalls eine prozesstechnisch wesentliche Rolle. In den Drehrohröfen werden Korngrößen < 20 mm verwendet, während die am Wärmetauscher (Kalzinator) aufgegebenen Ersatzbrennstoffe grober sein können (< 80 mm). Je feiner der Brennstoff, desto intensiver sind seine Aufbereitungskosten (Stromverbrauch, Verschleißkosten, Zeit). Dies ist ebenso zu berücksichtigen, wenn es darum geht, sich für eine interne oder externe Abfallaufbereitung zu entscheiden.

Ersatzbrennstoffe werden nach ihrer Aufbereitung in Silos oder Bunkern zwischengelagert, bevor sie zur Verbrennung dosiert werden. Darin werden sie oft einer Vorvermischung und Materiallockerung (durch Druckluft oder Mischaggregate) unterzogen, um die Schwankungsbreite der Qualitätseigenschaften gering zu halten sowie den Austrag zu erleichtern.

4.3 Lagerung

Abgesehen von ausreichender Dimensionierung müssen die Ersatzbrennstofflager so konzipiert werden, einen störungsfreien und kontinuierlichen Brennstofftransport zu ermöglichen. Üblicherweise werden die Kapazitäten auf 3 bis 5 zusätzliche Reservetage ausgelegt, um eine Überbrückung über die Wochenenden, Feiertage oder Lieferausfälle kompensieren zu können³⁰.

Andererseits sind zu groß ausgelegte Lager aufgrund hoher Installationskosten unwirtschaftlich und außerdem für die zu lagernde Brennstoffmenge oft riskant, da es durch Kompression und Restfeuchte zur Klumpenbildungen kommen kann und damit der Brennstoffaustrag erschwert wird.

Um die eingelagerten Brennstoffe vor Witterungseinflüssen zu schützen und die Beeinträchtigung nach außen durch Lärm- und Geruchsbelästigung gering zu halten, werden die Abfälle normalerweise in geschlossenen Hallen oder Silos gelagert. Bei den EBS-Hallen gibt es oft getrennte Bunker, in denen verschiedene Brennstoffarten (z.B. zerkleinerte Altreifen, aufbereiteter Siedlungsabfall, Biomasse) eingelagert und später zu einem Brennstoff-Mix zusammengesetzt werden. Solche Hallen sind üblicherweise mit Greiferkränen ausgestattet, die über die fahrbaren Kranschienen den gesamten Bunkerbereich erfassen können.



Abb. 18: EBS-Halle mit Greiferkranverladung (eigene Aufnahme)

Um die Geruchsbelästigung auf ein Minimum zu reduzieren, werden solche Hallen normalerweise am Rande der Zementwerke gebaut. Nicht zu vernachlässigen sind dabei auch die Brandschutzmaßnahmen, die für manche Ersatzbrennstoffe in den EBS-Hallen erforderlich sind. Dies spielt beispielsweise bei Siedlungsabfällen eine Rolle, wo organisch-biologische Rückstände nicht ganz auszuschließen sind.

³⁰ Vgl. Denizeau, Stoerker, Demirtas, Landais, Shah, de Robert, Desseix, Hamm, Mc Quillan: Fuel Flexibility Study, S. 56

Die im Gärungsprozess entstandenen Gase können zu gefährlichen Selbstzündungen und Bränden führen. Aus diesem Grund sind vorherige Risikoanalysen der zu lagernden Ersatzbrennstoffe wichtig. Mögliche präventive Maßnahmen zum Thema Brandschutz sind beispielsweise Installationen von Infrarotkameras, automatischen Branddetektoren, Sprinkleranlagen oder das Anbringen der Feuerlöscher.

4.4 Abfallbeschickung

Das EBS-Beschickungsequipment hat nicht nur die Aufgabe, die Entfernung zwischen Lagerstätte und Aufgabepunkt des Brennstoffs zu überbrücken, sondern auch die transportierten Brennstoffe entsprechend zu dosieren. Dies ist für die Regelung der Feuerleistung von großer Bedeutung. Das Beschickungsequipment, welches die Brennstoffe entweder in Richtung Hauptbrenner (am Drehrohrföfen) oder Sekundärbrenner (am Wärmetauscher / Kalzinator) transportiert, wird vom zentralen Leitstand geregelt.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an das Feuerungssystem kommt dem der Feuerung vorgeschalteten Beschickungssystem jeweils unterschiedliche Bedeutung zu. Das Transportsystem besteht aus mehreren hintereinander geschalteten Förderaggregaten (Kettenförderer, Förderschnecken oder -Bänder) und aus einer elektronisch gesteuerten Vorrichtung (z.B. Bandwaage) für die gleichmäßige Brennstoffdosierung.

Das folgende vereinfachte Fließschema zeigt ein typisches Transportsystem für die Beschickung des Wärmetauschers:

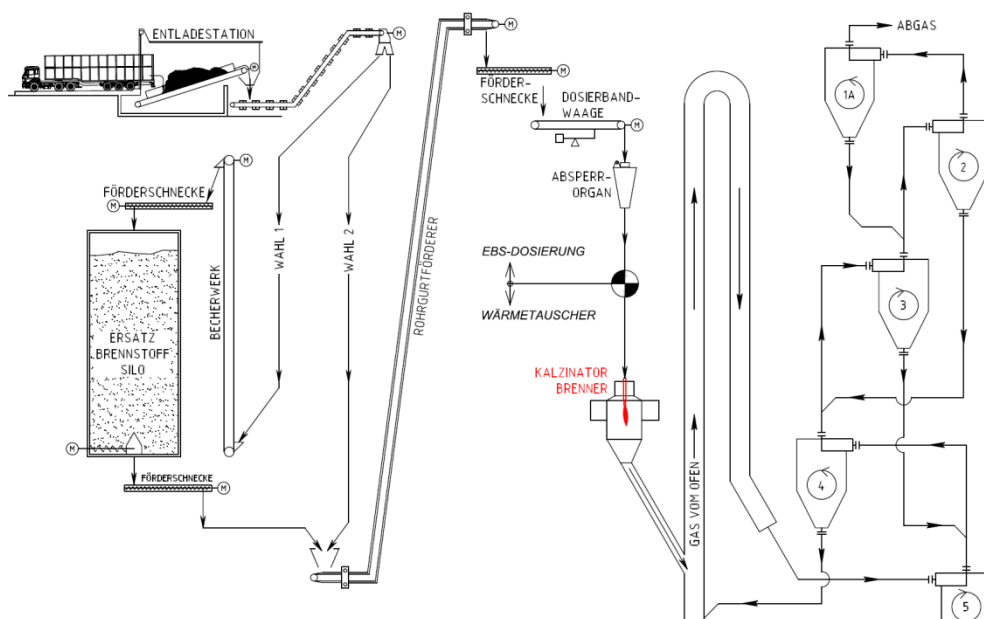


Abb. 19: Fließschema der EBS-Förderung zum Wärmetauscher

Die zweite Möglichkeit der EBS-Förderung ist in Richtung Hauptbrenner bzw. zum Drehrohrofen:

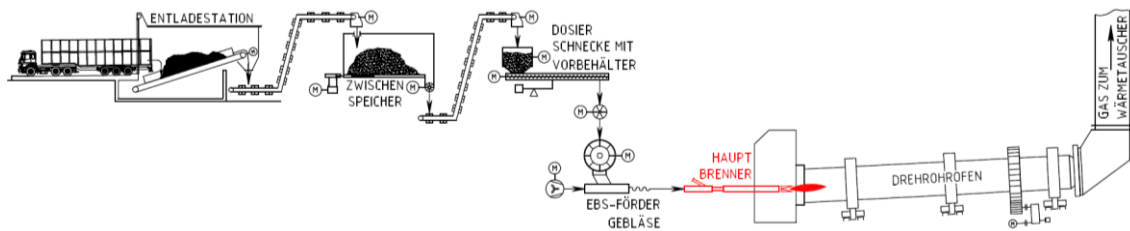
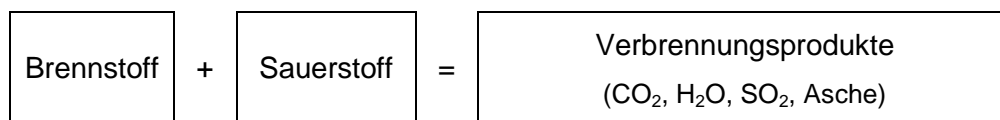


Abb. 20: Fließschema der EBS-Förderung zum Hauptbrenner

Zum Zwecke einer einfacheren Darstellung sind die beiden Fließschemen getrennt dargestellt. Je nach anwendungs- und betriebsspezifischer Anforderung können sie sehr wohl miteinander kombiniert werden. Hierfür sind die erforderlichen Korngrößen des Ersatzbrennstoffs zu beachten.

4.5 Verbrennungsprozess

Unter Verbrennung von Brennstoffen versteht man im Allgemeinen eine chemische Reaktion des Brennstoffes mit Sauerstoff (Oxidation), bei der Energie freigesetzt wird³¹.



Bei einer vollständigen Oxidation aller oxidierbarer Bestandteile, spricht man von einer vollständigen Verbrennung. Wichtige Voraussetzungen für eine vollständige Verbrennung sind ausreichend hohe Temperaturen, gute Vermischung der Brennstoffe mit heißen Ofengasen, ein kleiner Luftüberschuss sowie eine ausreichende Verweilzeit der Brennstoffteilchen in der heißen Verbrennungszone³².

Die beim Oxidationsprozess freigesetzte Wärmeenergie wird dazu genutzt, jene physikalischen und chemischen Reaktionen hervorzurufen, die zur Transformation von Rohmehl zu Zementklinker notwendig sind. Aus diesem Grund steht die qualitative Aufbereitung der Abfälle in engem Zusammenhang mit der Feuerungstechnologie des Herstellprozesses.

³¹ Vgl. Woltron: ATEC Training Fuels and Combustion : firmeninterne Schulungsunterlagen

³² Vgl. Döring: Pellets als Energieträger : Technologie und Anwendung, S. 36

Verbrennungsreaktionen verlaufen in der Regel durch mehrere Zwischenschritte, bei denen einige Zwischenprodukte entstehen können. Allerdings verbleiben nach einer vollständigen Verbrennung bzw. Oxidation nur noch einfache Verbrennungsprodukte, genauer gesagt drei einfache Moleküle - CO_2 , H_2O und SO_2 .

Wie bereits diskutiert wurde, sind die am Hauptbrenner dosierten Ersatzbrennstoffe feiner zerkleinert als jene, die am Wärmetauscher aufgegeben werden. Der wesentliche Grund für diesen Unterschied liegt darin, dass die Dauer des vollständigen Ausbrennens im Drehrohrofen kürzer und daher eine reaktionsschnellere Vermischung des Brennstoffs mit der Verbrennungsluft erforderlich ist. Weiters ist diese Feinheit aus Regelungsgründen notwendig, um eine bestimmte Flammenbildung in der Mitte des Drehrohrofens erzeugen zu können.

Andererseits sind Wärmetauscher in der Regel für eine längere Verweilzeit des Ersatzbrennstoffs (> 5 Sekunden) konzipiert, wodurch ein vollständiges Ausbrennen der größeren Brennstoffpartikel (< 80 mm) ermöglicht wird.

5 Rechtliche Rahmenbedingungen für Abfallverwertung

5.1 Rahmenbedingungen auf EU-Ebene

5.1.1 Richtlinie 2000/76/EG

In dieser Abfallverbrennungsrichtlinie werden bestimmte Verbrennungsbedingungen bei Verbrennungsanlagen festgelegt. Weiters werden darin Emissionsgrenzwerte für die Luft und das Wasser vorgeschrieben. Die Mitverbrennung der Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie wird in dieser Richtlinie gesondert behandelt³³.

5.1.2 Richtlinie 2008/1/EG (IVU-Richtlinie)

Diese Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung betrifft industrielle Anlagen, die ein großes Potenzial zur Umweltverschmutzung haben und eine grenzüberschreitende Verschmutzung verursachen können. In englischer Sprache ist sie als IPPC-Richtlinie bekannt (Integrated Pollution Prevention and Control). Diese im Jahr 2008 vom Europäischen Parlament beschlossene Richtlinie, ist eine Nachfolgerin der im Jahr 1996 (96/61/EG) verabschiedeten Richtlinie und sieht in ihrer neuen Version weitere Maßnahmen zur Vermeidung von Umweltverschmutzung sowie Mindestanforderungen für die EU-Mitgliedsstaaten in den erforderlichen Vorkehrungen vor³⁴.

Eine Anlagengenehmigung erfolgt nach der IVU-Richtlinie, die auf Grundlage der besten verfügbaren Techniken (in Österreich: Stand der Technik) sowie einem hohen Schutzniveau gegen Schadstoffemissionen definiert wird. Besonders zu beachten sind die Schutzmaßnahmen der Verlagerung der Verschmutzung von einem Medium auf ein anderes, beispielsweise die Gefahr der Gewässerbelastung durch die Rauchgasreinigung. Falls erforderlich, sind zusätzliche Genehmigungsaufgaben zum Schutz des Bodens, des Grundwassers und zur Abfallbehandlung vorzusehen³⁵.

³³ Vgl. Böhmer, Kögler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 28

³⁴ Vgl. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32008L0001>, verfügbar am 17.11.2015

³⁵ Vgl. Böhmer, Kögler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 28

5.2 Nationale Rahmenbedingungen (Österreich)

5.2.1 Abfallwirtschaftsgesetz 2002

Vorsorge und Nachhaltigkeit für die Abfallwirtschaft sind die prägenden Leitsätze dieses österreichischen Bundesgesetzes. Eine moderne Abfallwirtschaft ist darauf auszurichten, dass keine schädlichen oder nachhaltig negativen Folgen auf Mensch, Tier oder Pflanzen entstehen dürfen bzw. unsere Lebensgrundlage oder die Umwelt keine nachhaltig negative Beeinflussung erlebt. Die Besonderheit dieses Gesetzes ist auch, dass nur Abfälle zurückbleiben dürfen, deren Ablagerung keine Gefährdung für nachfolgende Generationen darstellt³⁶.

Im Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002) sind die rechtlichen Rahmenbedingungen betreffend Pflichten für Abfallbesitzer, Abfallsammler und -Verwerter, Verwertungssysteme und Behandlungsanlagen genau definiert.

In Bezug auf die thermische Behandlung von Abfällen, in welche auch Zementwerke fallen, werden unter anderem bestimmte Genehmigungsprozeduren geregelt. Eine Abfallverbrennungsanlage, die als sogenannte IVU-Anlage betrieben wird, wird von den zuständigen Behörden einer periodischen Kontrolle unterzogen.

Das Abfallwirtschaftsgesetz dient als Wirtschaftsmotor in Richtung der Verwendung von Ersatzbrennstoffen und sieht bei Nichteinhaltung bzw. ungesetzlich durchgeführter Deponierung hohe Geldstrafen vor. Auf diese Weise wird das Recycling und die thermische Verwertung stark forciert³⁷.

5.2.2 Deponieverordnung

Der wichtigste Teil dieser, im Jänner 2004 verabschiedeten Verordnung wird im Abschnitt 3 „Behandlungspflicht und Deponierungsverbot“ definiert. Kein Kilogramm Abfall, dessen Anteil an organischem Kohlenstoff (TOC) mehr als fünf Masseprozent beträgt, darf mehr unbehandelt auf einer Deponie landen. Laut dieser Bestimmung ist das Vermischen eines Abfalls mit anderen Abfällen dann verboten, wenn die dafür notwendige Behandlung zusätzlich erschwert wird.

³⁶ Vgl. <https://www.ris.bka.gv.at>, verfügbar am 17.11.2015

³⁷ Vgl. Saunders: Global Cement Magazine : Februar 2015, S. 8-15

In der Verordnung werden unter anderem verschiedene Deponietypen, mögliche Standorte, Deponiebetrieb und Genehmigungsprozeduren festgelegt. Jede Deponietype muss bestimmte Anforderungen erfüllen, wie auch die genaue Festlegung, welche Abfälle auf bestimmten Deponietypen gelagert werden dürfen. Eine definitive Abfalldeponierung ist nur dann zulässig, wenn durch die behördliche Kontrolle ein positiver Bescheid vorliegt³⁸.

5.2.3 Abfallverbrennungsverordnung

Um den Abfall als Brennstoff in der Zementproduktion verbrennen zu dürfen, ist die Abfallverbrennungsordnung ausschlaggebend. Diese Verordnung sieht Richtlinien für den Schutz der Einwohner und das ökologische Wohlbefinden vor. Sie beschreibt maximale Emissionsgrenzwerte und die Arten von Abfällen, die für die Verbrennung geeignet sind³⁹.

Diese nationale Regelung dient der Umsetzung der EU-Richtlinie 2000/76/EG über die Verbrennung von Abfällen. Darin werden auch Anforderungen an die Verbrennungstechnik und an die Betriebsbedingungen der Anlage festgelegt⁴⁰.

5.2.4 Richtlinie für Ersatzbrennstoffe

In dieser Richtlinie werden Anforderungen für den thermischen Einsatz der Ersatzbrennstoffe in Mitverbrennungsanlagen geregelt. Die für den Einsatz mindestens erforderliche Qualität von Ersatzbrennstoffen ist dabei von der Art der nachfolgenden thermischen Verwertung abhängig, wobei folgende drei Anlagentypen unterschieden werden:

- Anlagen zur Zementerzeugung
- Kraftwerksanlagen und
- Sonstige Mitverbrennungsanlagen

Diese Richtlinie dient der besonderen Orientierung für jene Anlagenplaner und -betreiber, die eine EBS-Verbrennung beabsichtigen und wird den Behörden als Unterlage in den Genehmigungsverfahren empfohlen. Für jede der oben angeführten drei Anlagentypen werden in der Richtlinie jeweils unterschiedliche Heizwerte und umweltbezogene Grenzwerte mit bestimmten Qualitätsvorgaben formuliert.

³⁸ Vgl. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien: DVO 2008 idF v. BGBl. II Nr. 455/2011, S. 9

³⁹ Vgl. Saunders: Global Cement Magazine : Februar 2015, S. 8-15

⁴⁰ Vgl. Böhmer, Kügler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 30

Der Inhaber einer Mitverbrennungsanlage darf nur jene Ersatzbrennstoffe einsetzen, für die ein gültiger Beurteilungsnachweis vorliegt. Die dafür notwendigen analytischen Untersuchungen können alternativ auch von Lieferanten oder Herstellern der Ersatzbrennstoffe durchgeführt werden⁴¹.

5.3 Bilaterale Gesetze und Vorgaben

5.3.1 Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Seit ihrem Inkrafttreten im Jahr 2000 hat sich die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) in der Europäischen Union und somit auch in Österreich als Instrument der Umweltvorsorge etabliert.

Vor der Erteilung der Genehmigung für ein bestimmtes Projekt ist eine medienübergreifende Umweltprüfung durchzuführen. Dabei werden die Umweltauswirkungen eines Vorhabens in einer umfassenden Studie ermittelt, detailliert beschrieben und bewertet sowie unter medialer Einbeziehung zur Verfahrensentscheidung gebracht. Die Umweltverträglichkeitsprüfung befasst sich mit Anlagen zur thermischen Behandlung von nicht gefährlichen Abfällen mit einer Kapazität von mindestens 35.000 Tonnen/Jahr zum Genehmigungsverfahren.

Vor dem Inkrafttreten dieses Gesetzes wurden die Abfallverbrennungslagen größtenteils als Abfall- und Altölbehandlungsanlagen oder als gewerbliche Betriebsanlage genehmigt⁴².

⁴¹ Vgl. Neubauer, Walter: Behandlung von gemischten Siedlungs- und Gewerbefällen in Österreich : Betrachtungszeitraum 2003 bis 2007, S. 24

⁴² Vgl. Böhmer, Kügler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 37f

5.3.2 Emissionsgrenzwerte für Anlagen zur Zementerzeugung

Die Schadstoffemissionen können in drei Hauptgruppen untergliedert werden:

Schadstoffgruppe	Schadstoffe	Relevanz
Klassische Luftschadstoffe	Staub, NO _x , SO ₂ , HCl, HF, CO	Mittel
Metallische Spurenelemente	Quecksilber, Cadmium, Thallium,...	Niedrig
Kohlendioxid (CO ₂)	CO ₂	Hoch

Tab. 4: Einteilung der Schadstoffe in Hauptgruppen⁴³

In den Anlagen zur Zementerzeugung, in denen Abfälle mitverbrannt werden, dürfen folgende Emissionsgrenzwerte im Abgas nicht überschritten werden (EU-Norm):

Schadstoff	Grenzwert ⁽¹⁾	Einheit	Anmerkung
staubförmige Emissionen	30	mg/m ³	Tages-Mittelwert
Kohlenstoffmonoxid (CO)	Behörde kann einen Emissionswert festlegen		
Chloride (HCl)	10	mg/m ³	Tages-Mittelwert
Schwefeldioxid (SO ₂)	50	mg/m ³	
Stickstoffdioxide (NO und NO ₂), angegeben als NO _x	500	mg/m ³	
Schwermetalle Cadmium, Thallium und ihre Verbindungen	0,05	mg/m ³	
Summe der Elemente Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium, Zinn und ihre Verbindungen	0,5	mg/m ³	
Quecksilber (Hg) und seine Verbindungen	0,05	mg/m ³	

⁽¹⁾ Basis: 10% Sauerstoffgehalt im Abgas

Tab. 5: Emissionsgrenzwerte für Ofenlagen zur Zementklinkererzeugung⁴⁴

Diese Emissionsgrenzwerte und ihre Rechtsvorschrift sind als Zementverordnung 2007 in der österreichischen Gesetzgebung definiert und sind mit den EU-Vorschriften konform.

⁴³ Vgl. Hackl, Mausitz: Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie V, S. 2

⁴⁴ Vgl. VDZ: Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess, S. 35

6 Hauptprozesse der Zementproduktion

Um dem prozesstechnischen Einfluss der EBS-Verbrennung näher zu kommen, werden in diesem Kapitel die wichtigsten Eigenschaften einer modernen Anlage zur Zementherstellung beschrieben.



Abb. 21: Bild eines klassischen Zementwerkes aus der Vogelperspektive⁴⁵

Der Zementherstellungsprozess erfolgt in drei Hauptphasen:

- Aufbereitung von Rohmaterial
- Pyroprozess (Brennprozess)
- Verarbeitung von Klinker, Lagerung und Versand

Die Ersatzbrennstoffe werden ausschließlich im Pyroprozess bzw. an den Drehrohröfen und Wärmetauschern aufgegeben. Aus diesem Grund liegt der logische Schwerpunkt dieser Beschreibungen gerade hier.

Eine angemessene verfahrenstechnische Auslegung der EBS-Einsatzmengen im Pyroprozess ist für die Verbrennungsmechanismen sowie die Anlagestabilität von wichtigster Bedeutung, da die Zementqualität durch die NebenkompONENTEN beeinflusst werden kann⁴⁶.

Die Zementherstellung ist ein komplexer Prozess, der große Mengen an Rohmaterial sowie thermischer und elektrischer Energie benötigt. Dabei werden verschiedene Rohstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt, die unter hohem Energieeinsatz zu Zementklinker gebrannt bzw. zu Zement vermahlen wird.

⁴⁵ Vgl. VÖZ: Zementerzeugung in Österreich, S. 37

⁴⁶ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Production; S. 2

Um eine Tonne Zementklinker herzustellen, werden je nach Anlage 3,2-6,3 Gigajoule (GJ) an Energie und 1,7 Tonnen Rohmaterial benötigt⁴⁷.



Abb. 22: Drehrohrföfen in einem Zementwerk (eigene Aufnahme)

Zur Verdeutlichung dieses hohen Energiewertes kann ein herkömmliches europäisches Zementwerk mit einer Kapazität von 2000 Tonnen Klinker pro Tag als Beispiel genannt werden. Bei einer ausschließlichen Anwendung von fossilen Brennstoffen (z.B. Kohle) würde so ein Zementwerk eine gewaltige Jahresmenge von ca. 75.000 Tonnen Kohle benötigen, was einen Millionenbetrag an Kosten bedeuten würde. Daher wird in der heutigen Zementindustrie eine breite Palette von Ersatzbrennstoffen verwendet, um die gewaltigen Energiekosten zu senken.

6.1 Aufbereitung des Rohmaterials

Das Rohmaterial wird in Steinbrüchen abgebaut, danach im Bereich des Steinbruchs grob auf etwa 25-100 mm Korngröße zerkleinert und nachfolgend in den sogenannten Mischbetten zwischengelagert. Anschließend wird es aus dem Mischbett entnommen und die separaten Silos weiter transportiert. Je nach ursprünglicher chemischer Zusammensetzung des Ausgangsmaterials erfolgt seine finale chemische Anpassung mit sogenannten Korrekturstoffen (z.B. Quarz, Bauxit oder hochqualitativer Kalkstein).

Diese Korrekturstoffe erleichtern die erforderliche Sinterung des Rohmaterials beim nachfolgenden Klinkerbrennen. Durch die separaten Rohmaterial- und Korrekturstoffe-Dosiersilos erfolgt eine kontinuierliche Beschickung des Rohgemischs an die Rohmühle, die passend zum gewünschten Produkt unterschiedliche Materialmengen vermahlen kann.

⁴⁷ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 85

Die Korngröße des Rohmaterialgemischs wird in der Rohmühle auf etwa 90% kleiner als 90 Mikrometer (entspricht 0,09 mm) reduziert. Die restliche Feuchte des zu mahlenden Rohmaterials wird dabei durch die heißen Abgase aus dem Ofensystem getrocknet. Diese Feinheit des Rohmaterials ist erforderlich, um eine gewünschte Brennbarkeit erreichen zu können.

Das fertiggemahlene Rohmaterialgemisch wird anschließend im sogenannten Homogenisierungssilo gelagert⁴⁸.

6.2 Pyroprozess / Brennprozess

Der Pyroprozess bzw. der Brennvorgang zur Transformation von Rohmaterial zum Klinker beinhaltet vier aneinander geknüpfte Vorgänge:

- das stufenweise Vorwärmen des Rohmaterials
- die Rohmaterial-Kalzinierung (Entsäuerung)
- die Umwandlung des Rohmaterials in Klinker und
- die rasche Abkühlung auf dem Rostkühler⁴⁹.

Aus der Sicht der Verfahrenstechnik durchläuft der Brennvorgang zwei Prozesse:

- Kalzination des stufenweise aufgeheizten Kalksteins (ab ca. 800°C) im Wärmetauscher und seine Zerteilung ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) in Kalziumoxid und Kohlendioxid. Dieser Vorgang, bei dem CO_2 entweicht, wird als Entsäuerung (Kalzination) bezeichnet.
- Sinterung des aus dem Wärmetauscher kommenden und kalzinierten Rohmaterials im Drehrohrföfen bei einer höheren Temperatur ab ca. 1450°C. Als Sinterung wird eine chemische Reaktion gekennzeichnet, bei der die Materialien knapp unter der Schmelztemperatur aufgeheizt werden. Dabei kommt es in der Regel zu einer Rohmaterial-Schwindung, wobei sich die Partikel des Ausgangsmaterials verdichten und Porenräume aufgefüllt werden⁵⁰. Das Rohmaterial nimmt eine kugelige Form an.

⁴⁸ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 9

⁴⁹ Vgl. VÖZ: Zementerzeugung in Österreich, S.13

⁵⁰ Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Sintern>, verfügbar am 23.11.2015

6.2.1 Wärmetauscher

Moderne Zementproduktionsanlagen verfügen heute über energieeffiziente, mehrstufige Wärmetauscher, in welchen nach dem Gegenstromprinzip der Wärmeübergang zwischen dem kalten, nach unten strömenden Rohmaterial und dem heißen, aufsteigenden Ofenabgas, stattfindet.



Abb. 23: Wärmetauscher in einem Zementwerk (eigene Aufnahme)

Das Rohmaterial wird dabei direkt zwischen der ersten und zweiten Zyklonstufe in das nach oben aufsteigende, heiße Ofenabgas aufgegeben, welches mit einem großen Ventilator (in der Fachsprache als ID-Fan bekannt) durch die übereinander angeordneten Zyklonstufen nach oben gesaugt wird. Zunächst wird es bei einer Temperatur von ca. 350-400 °C in der obersten Zyklonstufe aufgegeben, nach oben samt dem Ofenabgas in den obersten Zyklon gesaugt und dort vom Abgas abgeschieden. Das vorgewärmte Rohmaterial rutscht über die Schwerkraft in die darunter liegende Zyklonstufe.

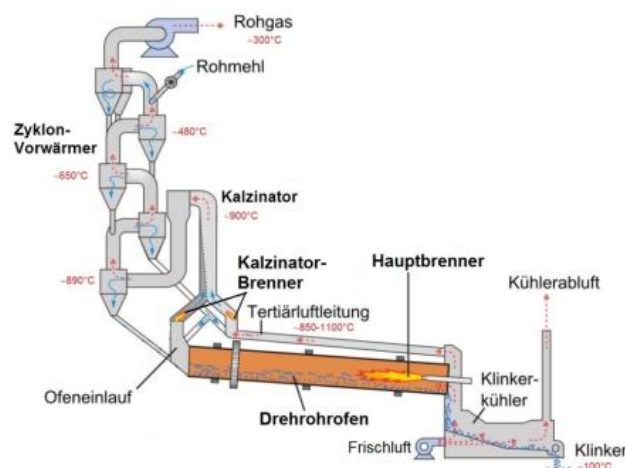


Abb. 24: Wärmeübergangsprozess im Wärmetauscher ⁵¹

⁵¹ Vgl. VDZ: Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess, S. 11

Dieser Wärmeübergang wiederholt sich, Stufe für Stufe und bei immer steigenden Temperaturen nach unten in Richtung Drehrohrofen. Abschließend gelangt das großteils kalzinierte Rohmaterial bei einer Eintrittstemperatur von 850-900°C in den Drehrohrofen, wo die Sinterung des Rohmaterials erfolgt.

6.2.2 Drehrohrofen

Nach der Kalzination im Wärmetauscher gelangt das Material in den Drehrohrofen. Durch die Drehbewegung des Ofens nimmt das Material eine kugelige Form an und gelangt aufgrund der Schräglage des Ofenrohrs in immer heißere Ofenzonen in Richtung Auslauf. Drehrohröfen sind längliche, zylinderförmige Reaktoren mit einer Länge von ca. 50-60 Metern und einem durchschnittlichen Durchmesser von ca. 4 Metern. Sie sind beweglich gelagert und drehen sich langsam (ca. 3-4 Umdrehungen pro Minute) um die eigene Längsachse.



Abb. 25: Größenvergleich Mensch und Drehrohrofen (eigene Aufnahme)

Am auslaufseitigen Ende des Drehrohrofens befindet sich der Hauptbrenner, in dem die notwendigen heißen Ofengase, unter anderem mit Ersatzbrennstoffen, produziert werden.

Bei der Bestimmung der Brennstoffmengen ist es wichtig, ein vollständiges Ausbrennen im Ofen zu erreichen, damit keine Beeinträchtigungen der Klinkerqualität entstehen. Diesbezüglich werden die Brennerflammen entsprechend eingestellt⁵².

⁵² Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 11



Abb. 26: Hauptbrenner – Blick in Richtung Drehrohrofen (eigene Aufnahme)



Abb. 27: Ofenbrennerflamme (mit Thermobild-Kamera aufgenommen)

Bei Rohmaterialtemperaturen von etwa 1450°C bilden sich im Sinterprozess die Klinkermineralien. Am Ofenauslauf fällt der Zementklinker direkt auf den Rost eines Klinkerkühlers, wo er rasch auf ca. 90°C abgekühlt wird. Eine rasche Abkühlung ist notwendig, um die hydraulischen Eigenschaften des Klinkers zu erhalten. Anschließend wird der vollständig abgekühlte Klinker in einen Klinkersilo weiter transportiert.

6.3 Verarbeitung von Klinker, Lagerung und Versand

Der aus dem Rostkühler transportierte Klinker wird in einem riesigen Klinkersilo zwischengelagert, bevor er zum Endprodukt Zement vermahlen wird. Seine Vermahlung findet gemeinsam mit Zuschlagstoffen (Hüttensand, Flugasche, Kalkstein oder Gips) in Zementmühlen statt⁵³. Art und Menge der einzelnen Zuschlagstoffe wird in Abhängigkeit von der gewünschten Zementsorte gemäß Zementnorm gewählt. In Europa wird beispielsweise die einheitliche Zementnorm EN197-1 verwendet, bei der 27 verschiedene Zementarten definiert sind. In Österreich werden aufgrund der klimatischen Bedingung nur 11 Zementarten produziert⁵⁴.

Die Mahlfeinheit des Zements wird ebenso auf die anzuwendende Zementnorm abgestimmt, da sie die physikalischen und technologischen Eigenschaften des Endproduktes beeinflusst. Letztendlich wird der fertige Zement in den Zementsilos gelagert und von dort per LKW oder über den Seeweg an seine Kunden vertrieben.

⁵³ Vgl. VÖZ: Zementerzeugung in Österreich, S. 15

⁵⁴ Vgl. <http://www.zement.at/zement/zement/zementsorten-bezeichnungenennormen>, verfügbar am 23.11.2015

7 Ersatzbrennstoffe in der Zementproduktion

Die meisten natürlichen und synthetisch hergestellten Materialien besitzen einen bestimmten Energiewert, der als Ersatzbrennstoff eingesetzt werden kann. Dieser Einsatz ist nicht nur zur Herstellung von Zementklinker von Bedeutung, sondern auch für die Umwelt selbst. Seit den 1980er Jahren, als die ersten Versuche damit begannen, hat sich die Anwendungstechnologie derart weiterentwickelt, dass manche Zementwerke eine nahezu 100%ige Substitutionsrate am Wärmetauscher aufweisen können. Obwohl die hohen Anwendungen am Drehrohrofen aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Zementklinkerqualität sowie die Umwelt nach wie vor limitiert sind⁵⁵, ist der prozentuelle Anteil von heute im Vergleichszeitraum der letzten 20 Jahre signifikant gestiegen.

Heutzutage gibt es verschiedenste Arten von anwendbaren Ersatzbrennstoffen. Sehr beliebt aufgrund ihres hohen Heizwertes sind beispielsweise die zerkleinerten Altreifen, die als sogenannte „Reifenschnitzel“ dem Brennprozess zugeführt werden.



Abb. 28: Altreifen auf einer offenen Müllhalde (eigene Aufnahme)

Auch die lösemittelhaltigen und Kunststoff-Abfälle haben einen höheren Energiewert als die fossilen Brennstoffe, jedoch ist deren Anwendung aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung begrenzt. Hingegen sind Siedlungsabfälle als die am leichtesten verfügbare Ersatzbrennstoffe zu bezeichnen.

Aus diesem Grund ist es wichtig, nicht nur die Heizwerte, sondern auch den physikalischen Zustand sowie die chemische Zusammensetzung näher zu betrachten. Zu den diesbezüglich wichtigen Merkmalen zählen hier der Feuchtigkeitsgrad und die Menge von sogenannten flüchtigen Bestandteilen. Diese Merkmale werden im nachfolgenden Text näher beschrieben.

⁵⁵ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 87

Eine neu zu konzipierende EBS-Anwendung erfordert oft Umstellungen des Brennprozesses und den Austausch bestehender Dosierapparate. Eine der ersten möglichen Umbaumaßnahmen kann beispielsweise die Installation eines neuen Multikanal-Hauptbrenners am Drehrohrföfen sein, mit dem eine kontrollierte und flexible Brennstoffdosierung ermöglicht und somit ein optimiertes Verbrennungsverhalten erreicht werden kann⁵⁶.

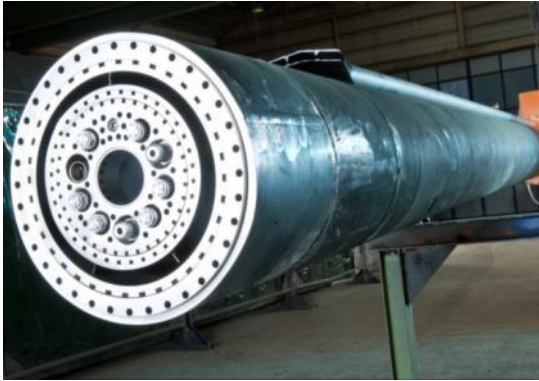


Abb. 29: Vorderseite eines Multikanal-Ofenbrenners (eigene Aufnahme)



Abb. 30: Hinterseite eines Multikanal-Ofenbrenners (eigene Aufnahme)

Abgesehen von den technologischen Komponenten sind vor der Erstanwendung auch wirtschaftliche, wie beispielsweise der Herstell- oder Einkaufspreis für Ersatzbrennstoff sowie die Sicherung seiner langfristigen Verfügbarkeit, zu berücksichtigen. Außerdem soll der gewählte Ersatzbrennstoff möglichst leicht in der Handhabung und Lagerung sein, um die wirtschaftliche Rechtfertigung sicherzustellen.

Ein teurer Umbau der Produktionsanlage bei gleichzeitig unwirtschaftlicher Verwendung verlängert die Amortisationszeit der Investition deutlich. Somit ist so eine, oft sehr kostenintensive Investition, im Vorfeld aus diversen Blickwinkeln zu betrachten.

7.1 Definition und Normung

Der international tätige Weltwirtschaftsrat für nachhaltige Entwicklung (Englisch: World Business Council for Sustainable Development) bietet in diesem Zusammenhang folgende Definition:

„Ausgewählte Abfälle und Nebenprodukte mit erzielbarem Brennwert können als Brennstoffe in einem Zementföfen verwendet werden und ersetzen einen Teil der herkömmlichen, fossilen Brennstoffe wie zum Beispiel Kohle, bei strenger Erfüllung der Vorgaben.“

⁵⁶ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 87

In manchen Fällen können sie nur nach vorheriger Vorbehandlung verwendet um „maßgeschneiderte“ Brennstoffe für die Zementherstellung bereitzustellen zu können⁵⁷.

In anderen Literaturen sind wiederum Definitionen zu finden, die sich auf die erforderlichen Anforderungen zur Erreichung einer bestimmten Qualität beziehen. Demnach wird ein Ersatzbrennstoff als „heizwerte Fraktion“ nach folgenden Merkmalen definiert⁵⁸:

- gütegesicherter Brennstoff nach RAL-GZ 724
- der Brennstoff ist aus produktionsspezifischen Abfällen oder heizwerten Fraktionen
- der Brennstoff ist für die Mitverbrennung geeignet

Bei der Bezeichnung RAL-GZ 724 handelt sich um ein bestimmtes Qualitätssiegel, welches von der deutschen Gütegemeinschaft für Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz zur Erfüllung bestimmter Kriterien für Ersatzbrennstoffe vergeben wird⁵⁹.

In der heutigen Zementindustrie haben sich unter dem Begriff „Ersatzbrennstoff“ auch weitere Namen etabliert. Die Bezeichnungen dieser Namen beschreiben oft die eigentliche Herkunft des Brennstoffs, wie zum Beispiel:

RDF (Englisch: *Refuse-Derived Fuels*) → wird aus Siedlungsabfällen hergestellt

TDF (Englisch: *Tyre-derived fuels*) → wird aus Altreifen hergestellt

Biomasse-Brennstoffe → wird aus biogenen Materialien hergestellt

Weitere etablierte Bezeichnungen sind auch:

- Sekundärbrennstoffe
- AF als englische Abkürzung für „Alternative Fuels“
- „Climafuel“ als Ersatzbrennstoff-Markename des Konzerns Cemex oder
- ASB als „aufbereiteter Substitut Brennstoff“ des Unternehmens ThermoTeam in Österreich⁶⁰.

Weltweit existiert zwar noch immer keine exakte Normung oder Richtlinie für Zusammensetzung der Ersatzbrennstoffe, jedoch ist die Zementindustrie bestrebt, diese Standardisierung in einem bestimmten Ausmaß einzuführen.

⁵⁷ Vgl. Lechtenberg, Diller: Alternative Fuels and Raw Materials, S. 45

⁵⁸ Vgl. Nagel: Nachhaltige Verfahrenstechnik: Grundlagen, Techniken, Verfahren und Berechnung, S. 346

⁵⁹ Vgl. <http://www.ral-gutezeichen.de/gutezeichen-einzelanzeige.html>, verfügbar am 23.11.2015

⁶⁰ Vgl. http://www.thermoteam.at/cms/front_content.php?idart=3&idcat=4&lang=1, verfügbar am 27.11.2015

Die größten Problematiken liegen in spezifischen Eigenschaften der Produktionsanlagen, die sich auf eine Standardisierung indirekt auswirken. Beispielsweise ist es nicht ratsam, einen Ersatzbrennstoff mit einem hohen Schwefelgehalt zu verwenden, wenn das Rohmaterial selbst viel Schwefel beinhaltet.

Andererseits kann der gleiche Ersatzbrennstoff in Anlagen seine Anwendung finden, in welchen das Rohmaterial wenig Schwefel beinhaltet. Eine hohe Schwefelkonzentration ist beim Brennvorgang für Prozessinstabilitäten bzw. Ausfälle der Anlage verantwortlich, da das gebrannte Rohmaterial zu Verklebungen und Ansatzbildungen in der Anlage führt.

Aus diesem Grund hängt eine korrekte Ersatzbrennstoff-Auswahl nicht nur mit eigener Qualität, sondern auch mit betriebsspezifischen Kriterien zusammen⁶¹.

Die ersten Standardisierungsansätze dazu kommen aus der bereits erwähnten Bundesgütegemeinschaft für Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz in Deutschland⁶².

⁶¹ Vgl. Lechtenberg, Diller: Alternative Fuels and Raw Materials, S. 46

⁶² Vgl. Nagel: Nachhaltige Verfahrenstechnik: Grundlagen, Techniken, Verfahren und Berechnung, S. 346

7.2 Haupteinteilung

In der Zementindustrie werden die Ersatzbrennstoffe vorwiegend nach ihrem Aggregatzustand eingeteilt: fest, flüssig oder gasförmig.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Vielfalt diverser Anwendungs- und Herstellmöglichkeiten und enthält einen aktuellen Auszug der weltweit meistverwendeten Ersatzbrennstoffe⁶³:

	FEST	FLÜSSIG	GASFÖRMIG
getrockneter Klärschlamm	x		
Tiermehl	x		
RDF (Brennstoff aus Siedlungsabfall)	x		
Holzabfall / Sägespäne	x		
Reifen (ganz oder geschreddert)	x		
Gummi-, Kunststoff- oder Papierabfälle	x		
Textilien	x		
Landwirtschaftliche Abfälle (Getreide, Nussschalen, Reisschalen, Zuckerrohr...)	x		
öhlaltige Erde	x		
Bitumen		x	
Altöl		x	
petrochemische Abfälle		x	
chemische Abfälle		x	
Lösungsmittel		x	
Wachs		x	
Asphalt- oder Ölschlamm		x	
Palmkernöl		x	
Destillationsrückstände		x	
Deponiegas			x
Pyrolysegas			x

Tab. 6: Einteilung der Energieträger nach Aggregatzustand

Die dabei meistverwendeten Ersatzbrennstoffe sind festen Aggregatzustands, während die Gasförmigen sehr selten eingesetzt werden.

⁶³ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 21

7.3 Brennstoffanalysen

Eine Brennstoffanalyse umfasst im Wesentlichen folgende Untersuchungsmethoden⁶⁴:

Immediatanalyse (Kurzanalyse):	Bestimmung des Feuchtigkeits- und Aschegehaltes sowie der flüchtigen Bestandteile im Brennstoff
Elementaranalyse:	Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der festen Brennstoffe
Weitere Analysen:	Bestimmung von Heizwert, Korngrößenverteilung, Glühverlustbestimmung, Ascheschmelze

Um die Umweltemissionen sowie andere betriebsspezifische Anlageneigenschaften zu überwachen ist es ratsam, bei jeder Ersatzbrennstoff-Anlieferung regelmäßige Probekontrollen der wichtigsten Analyseparameter durchzuführen.

Im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit sollen Ersatzbrennstoffe folgende Eigenschaften aufweisen⁶⁵:

- ausreichender Heizwert, um die gezielte Brennerflammentemperatur und in weiterer Folge des gesamten Systems zu erreichen
- niedriger Feuchtigkeitsgehalt, der die Produktionskapazität beeinflussen kann
- geringe Menge an NebenkompONENTEN, die sich auf die Chemie des Zementklinkers und der Prozessstabilität negativ auswirken kann
- passendes Verhältnis zwischen flüchtigen und kohlenstoffhaltigen Fraktionen, da dies einen wichtigen Einfluss auf die Brennbarkeit hat

Bei der Durchführung einer Elementaranalyse ist besonderes Augenmerk auf den Chlor- und Schwefelanteil zu richten, da diese flüchtigen Bestandteile den größten Einfluss auf die Prozessstabilität haben.

Der Chlorgehalt ist erfahrungsgemäß im RDF und Tiermehl am höchsten, während der Schwefel vorwiegend im Siedlungsabfall, den Altölen und Reifen enthalten ist.

⁶⁴ Vgl. <http://www.lead.ruhr-uni-bochum.de/deutsch/Forschung/bslabor.htm>, verfügbar am 24.11.2015

⁶⁵ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 21-22

Dazu gibt es verschiedene Analysegeräte am Markt, welche die Probenahmen und Analysen, wahlweise vollautomatisch oder manuell, durchführen können⁶⁶:

Methode	Analysegerät	Analyse von:	Kurze Verfahrensbeschreibung
Immediat	Trocken-Schrank	Feuchtigkeit	Messung der Gewichts Differenz vor und nach der vorgegebenen Trocknungsdauer von 3 Stunden und Temperatur von ca. 100°C.
Immediat	Muffelofen	Aschegehalt	Der Brennstoff wird bei vorgegebener Aufheizprozedur und oxidierender Atmosphäre, bei einer Temperatur von ca. 800°C, eine Stunde belassen. Der Aschegehalt ergibt sich aus dem Quotienten des trockenen Probengewichts, vor und nach der Verbrennung.
Immediat	Muffelofen	Flüchtige Bestandteile	Diese Messung wird ebenso im Muffelofen durchgeführt, allerdings unter Luftabschluss. Der um die Analysefeuchtigkeit verminderte Gewichtsverlust nach dem Aufheizen auf ca. 900°C und dem Halten der Temperatur von sieben Minuten, entspricht dem Anteil der flüchtigen Bestandteile.
Elementar	CHNS Analysator (automatisch)	Chemische Elemente	Quantitative Messung des elementaren Anteils von Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel. Proben werden in reinem Sauerstoff vollständig verbrannt, bei dem die Verbrennungsprodukte CO ₂ , SO ₂ , H ₂ O mittels Infrarot-Absorption gemessen werden. Die N ₂ -Konzentration wird mittels einer Wärmeleitfähigkeitsmessung ermittelt. Standardmäßig werden immer fünf Analysen durchgeführt.
weitere	Kalorimeter	Heizwert	Probe wird in einem geschlossenen Gefäß unter reiner Sauerstoffatmosphäre bei einem Druck von 30 bar verbrannt. Aus der Temperaturerhöhung des Systems, dem Gewicht der Probe und der Wärmekapazität des Kalorimeters lässt sich der Brennwert errechnen. Unter Hinzunahme der Ergebnisse der Elementar- und Immediatanalyse wird der Heizwert errechnet.
weitere	Schwing-siebmaschine	Korngröße	Der feste Brennstoff wird auf einer Reihe von immer kleineren Sieben, auf das oberste Sieb mit der größten Maschenweite aufgegeben. Durch die schwingende horizontale Bewegung der Siebmaschine trennt sich der Brennstoff in verschiedene Größenklassen auf.

Tab. 7: Wichtige Geräte für die Brennstoffanalyse

⁶⁶ Vgl. <http://www.lead.ruhr-uni-bochum.de/deutsch/Forschung/bslabor.htm>, verfügbar am 24.11.2015

Die folgende Tabelle zeigt einige typische Untersuchungsergebnisse diverser Ersatzbrennstoffe, jedoch können die genauen Zahlen aufgrund der örtlichen Herkunft und dem Feuchtigkeitsgehalt voneinander abweichen:

	Immediatanalyse ⁽¹⁾ [%]			Elementaranalyse [%]						Heizwert [MJ/kg]	
	VM (a)	FC (b)	Asche	C	H	N	S	Cl	O (c)	LHV (2)	HHV (3)
Holz	78	10-15	0,3-6	51	6	0,8	0,1	0,01	42	-	16
Karton	85	7	8	49	5,8	0,1	0,1	-	45	-	17
Zeitung	89	10	1	52	5,9	0,1	-	-	42	-	19
Polyethylen	100	0	0	86	13	-	-	-	1	43	47
Polypropylen	100	0	0	86	13,8	-	-	-	0,2	43	46
Styropor	99,8	0,2	0	92	8	-	-	-	-	43	42
PVC (Polyvinyl-Chlorid)	94,8	4,8	0,4	41	5	-	-	48	6	19	23
RDF ^(d) (Ersatz-Brennstoff)	76	4,4-14	14,5	47	7	1	0,25	1,3	43,5	17	-
TDF ^(e) (Reifenschnitzel)	54	23	22,7	64	5,6	0,45	1,4	0,15	5,6	-	27
MBM ^(f) (Tiermehl)	66	8,9	25,1	48	6,7	9	0,7	0,5	20	18	-
Altöl	100	0	0	86	12	-	2	0,1	-	-	41

Alle Angaben sind in Prozent (%); Brennstoff auf Trockenbasis; Heizwert in MJ/kg (1 MJ/kg \approx 239 kcal/kg)

Legende: **(1)** Kurzanalyse zur schnellen Bestimmung der Zusammensetzung (flüchtige Bestandteile, fester Kohlenstoff und Asche); **(2)** LHV (englisch: Lower Heating Value = unterer Heizwert); **(3)** HHV (englisch: Higher Heating Value = oberer Heizwert); **(a)** englisch: VM „Volatile Matters“ für flüchtige Bestandteile; **(b)** englisch: FC "Fixed carbon" für fester Kohlenstoff; **(c)** Sauerstoff (O) wird als Differenzbetrag kalkuliert; **(d)** englisch: RDF "Residue Derived Fuel" für Ersatzbrennstoff; **(e)** englisch: TDF "Tyre Derived Fuel" = aus Altreifen zerkleinerter Brennstoff; **(f)** englisch: MBM "Meat and bone meal" für Tiermehl.

Tab. 8: Analysen einiger wichtiger Ersatzbrennstoff-Typen ⁶⁷

Kunststoffe weisen, mit Ausnahme von den PVC-Materialien, deren Wert um die Hälfte kleiner ist, den höchsten Heizwert (43 MJ/kg) auf. Mit einer Anzahl von 27 MJ/kg befinden sich die Reifenschnitzel annähernd im Bereich der (konventionellen) Kohle.

Andere Brennstoffe wie Holz, Papier, Karton, RDF und Tiermehl haben deutlich niedrigere Heizwerte als Altreifen (oder Kohle) und sind im Bereich von 16 bis 19 MJ/kg angesiedelt.

⁶⁷ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 28

Wichtig ist hierbei zu erwähnen dass in nahezu jedem Ersatzbrennstoff die Konzentration an flüchtigen Bestandteilen höher ist, als in vergleichsweise fossilen Brennstoffen. Kunststoffe und Altöle sind jene Ersatzbrennstoffe mit dem höchsten Anteil an flüchtigen Bestandteilen. Auch in Holz, Papier, Karton, RDF, Tiermehl und Reifen sind diese Konzentrationen hoch.

Die obere Tabelle enthält zwei Arten von früheren Bezeichnungen für Heizwerte, die heute folgend definiert werden:

- unterer Heizwert (LHV) → Heizwert
- oberer Heizwert (HHV) → Brennwert

Jedoch werden in der Zementwelt erfahrungsgemäß nach wie vor die alten Bezeichnungen verwendet. Der wesentliche Unterschied zwischen dem oberen und unteren Heizwert liegt in der Berücksichtigung des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfs⁶⁸:

Oberer Heizwert (HHV)	Unterer Heizwert (LHV)
Der Brennwert eines Brennstoffs gibt die Wärmemenge an, die bei der Verbrennung und anschließender Abkühlung der Verbrennungsgase auf 25°C sowie deren Kondensation freigesetzt wird.	...ist bei einer Verbrennung die maximal nutzbare Wärmemenge die auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs bezogen ist. Bei der Berechnung des Heizwertes wird davon ausgegangen, dass die zur Verdampfung des Wassers im Energieträger notwendige Energiemenge nicht nutzbar ist.

Tab. 9: Unterschied zwischen oberem und unterem Heizwert

Für die prozesstechnischen Auslegungen und Berechnungen werden aufgrund der zur Verfügung stehenden Energiemenge eher die unteren Heizwerte (LHV) berücksichtigt.

⁶⁸ Vgl. Kurzweil, Frenzel, Gebhard: Physik-Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, S. 150

7.4 Bestimmende Faktoren für eine erfolgreiche Anwendung

Für den Umbau bestehender oder die Konstruktion neuer Produktionsanlagen ist fachliches Verständnis über den Einsatz und die Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen erforderlich. Die wichtigsten technologischen Voraussetzungen werden in diesem Abschnitt näher beschrieben.

7.4.1 Heizwert

Im Vergleich zu fossilen Brennstoffen haben die Ersatzbrennstoffe oft einen fluktuierenden Heizwert. Bedingt durch das Herstellverfahren selbst, können größere oder ungenügend trockene Brennstoffpartikel weniger reaktiv sein und somit die Brennerflamme linienartig ausdehnen und die Temperatur im Drehrohrofen senken.

Als Folge einer niedrigeren Flammentemperatur und der damit unerreichten Ofentemperatur können bestimmte chemische Reaktionen beim Klinkerbrennen nicht stattfinden, was sich anschließend negativ auf die Qualität auswirkt.

Ungenügend trockene Brennstoffe bzw. ihr schlechtes Ausbrennen begünstigen Entstehung von Kohlenmonoxid (CO). Diese als Reduktionsatmosphäre bezeichneten Bedingungen können beispielsweise die Lebensdauer des inneren feuerfesten Schutzmantels im Drehrohrofen verkürzen und somit zu Produktionsausfällen und aufwendigen Reparaturen führen⁶⁹.

Ein ausreichender Heizwert ist auch aus wirtschaftlicher Sicht notwendig, da schlechtqualitative Fraktionen in größeren Mengen vorbehandelt und transportiert werden müssen – das schlägt sich in den Kosten nieder.

⁶⁹ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 29

7.4.2 Ausreichendes Ausbrennen

Ein unzureichendes Ausbrennen des Ersatzbrennstoffs wirkt sich ebenso negativ auf die Betriebsstabilität aus. Technologisch betrachtet führt ein schlechtes Ausbrennen des Ersatzbrennstoffs zu folgenden chemischen Reaktionen:

Wärmetauscher: Die Restverbrennung verlagert sich unerwünscht in die unterste Zyklonstufe und verursacht Reduktionsatmosphäre (CO-Bildung) und somit die Entstehung von höheren Schwefeldioxidemissionen (SO₂). Eine zu große SO₂-Bildung verursacht Rohmaterial-Verklebungen und Ansatzbildungen, sowohl im Drehrohrofen als auch im Wärmetauscher.

Drehrohrofen: Schlechtbrennende Brennstoffpartikel, die über den Hauptbrenner eingeblasen werden, fallen auf das Klinkerbett im Ofen und verursachen ebenso eine Reduktionsatmosphäre. Als negative Folge ist eine schlechtere Klinkerqualität sowie die Entstehung von SO₂ im Wärmetauscher zu erwarten⁷⁰.

7.4.3 Umweltemissionen

Die heutige Zementindustrie, insbesondere in Europa, steht unter immer größerem Druck seitens der Umweltschutzbehörden aber auch den Medien, ihre Schadstoffemissionen noch mehr zu reduzieren. Wie bereits im Kapitel 5.1.1 erwähnt, unterliegen die europäischen EBS-anwendenden Zementwerke den Bestimmungen der Europäischen Richtlinie 2000/76/EC.

Durch die Verbrennung der eingesetzten Brennstoffe sowie der Entsäuerung des Rohmaterials (Kalkstein) entstehen unweigerlich klimarelevante CO₂-Gase, die in die Atmosphäre emittiert werden. Um ihren Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, hat sich die internationale Zementindustrie im November 2000 zu einer 28%-gen Reduktion des CO₂-Ausstoßes verpflichtet.

An dieser Selbstverpflichtung der Industrie wurde sogar weiterentwickelt und ab Jänner 2005 ein Handelssystem für CO₂-Emissionen eingeführt. Dieser Emissionshandel bezieht sich auf die Verbrennung aller Brennstoffe, wobei die Ersatzbrennstoffe hierbei nicht berücksichtigt werden, da sie fossile Brennstoffe ersetzen und zur CO₂-Reduktion

⁷⁰ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 30

dieser führen⁷¹. Dieser Umstand macht die weitere Forcierung der Ersatzbrennstoff-Anwendung, aus der Sicht der Kosten, umso attraktiver.

Die wichtigsten europäischen Grenzwerte für Schadstoffemissionen sind in der folgenden EU-Richtlinie festgelegt⁷²:

Schadstoff	Grenzwert	Einheit
Staub (gesamt)	30	(mg/m ³) Kalkulationsbasis: 10% Sauerstoff (O ₂) befindet sich im Trockengas
Chloride (HCl)	10	
Stickstoffoxide (NO _x)	800 / 500	
Quecksilber (Hg)	0,05	
Schwefeldioxid (SO ₂)	50	

Tab. 10: Emissionsgrenzwerte für Anlagen zur Zementerzeugung in der EU

Chloride (HCl): Der zunehmende Einsatz von Ersatzbrennstoffen, vor allem durch die Kunststoffabfälle, begünstigt die Chlor-Einbringung in das Ofensystem. Der überwiegende Teil des Chlors wird im Brennvorgang in Form von Salz zwar im Zementklinker eingebunden, während ein kleiner Teil in Form einer sauren, gasförmigen Verbindung (HCl) freigesetzt wird.

Stickstoffoxide (NO_x): Diese Oxide werden als Sammelbezeichnung NO_x abgekürzt, da aufgrund der vielen Oxidationsstufen des Stickstoffs während der Verbrennung mehrere Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen entstehen⁷³. Diese Verbindungen reizen und schädigen Atmungsorgane und sind außerdem für die Entstehung von „saurem Regen“ verantwortlich. Die in der obigen Tabelle angeführten Grenzwerte von 800 mg/Nm³ sind für ältere Anlagen gültig, für neue Produktionsstätten ab dem Jahr 2007 gilt die Obergrenze von 500 mg/Nm³. Derzeit wird über eine neue Regelung diskutiert, die eine weitere, drastischere NO_x-Reduktion bewirken soll. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der EBS-Einsatz positiv auf die NO_x-Reduktion auswirkt. Eine höhere EBS-Substitutionsrate senkt die Brennerflammentemperatur und reduziert somit die thermische NO_x-Bildung. Darüber hinaus haben Ersatzbrennstoffe in der Regel einen höheren Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, die eine Neigung zur Nachverbrennung aufweisen und somit zur weiteren NO_x-Reduktion beitragen können.

⁷¹ Vgl. VDZ: Zement-Taschenbuch, S. 92-93

⁷² Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 43

⁷³ Vgl. <http://www.chemie.de/lexikon/Stickoxide.html>, verfügbar am 25.11.2015

Quecksilber (Hg): Obwohl dieses Element vorwiegend durch das Rohmaterial in den Brennprozess eingebracht wird, muss darauf geachtet werden, dass die Mitverbrennung von Siedlungsabfällen potentiell zu erhöhten Hg-Werten führen kann. Durch die hohe Neigung zur Flüchtigkeit verdampft das Quecksilber in den oberen Zyklonstufen und gelangt somit in die Atmosphäre⁷⁴. Derzeit gibt es verschiedene Methoden, um diesen Emissionen entgegenzuwirken, beispielsweise mittels *EXmercury-System*, welches als Partnerprojekt der österreichischen Firmen ATEC und Scheuch entwickelt wurde.

Schwefeldioxid (SO₂): Auch der Schwefel gelangt vorwiegend über das Rohmaterial in den Brennprozess. Das entstandene Schwefeldioxid verbleibt ebenso größtenteils im Rohmaterial. Aus diesem Grund sind die SO₂-Emissionen als vernachlässigbar zu betrachten.

Weitere geringe Emissionen, beispielsweise Fluoride (Fluorsalze) oder Schwermetalle (Thallium, Kadmium), sind in sehr geringen Konzentrationen nachweisbar. Diese Verbindungen, die vorwiegend durch das Rohmaterial in das System eingebracht werden, werden durch die hohen Prozesstemperaturen und ausreichenden Verweilzeiten hauptsächlich im Zementklinker eingebunden.

7.4.4 Flüchtige Bestandteile

Alkalische, schwefel- und chlorhaltige Verbindungen, die sowohl durch die Rohmaterial-Kalzination als auch durch die Brennstoffe entstehen, werden als flüchtige Bestandteile (englisch: volatile matters) bezeichnet.

Höhere Konzentrationen dieser Verbindungen wirken sich oft negativ auf die Prozessstabilität aus, da sie Ansatzbildungen des gebrannten Rohmaterials, insbesondere in den Wärmetauschern, verursachen. Dies hat zur Folge, dass der Drehrohfen niedergefahren wird und verstopfte Bereiche (z.B. Zyklone in Wärmetauschern) mühsam gereinigt werden müssen.

Wiederholte Abschaltungen wirken sich natürlich negativ auf die Verfügbarkeit und Produktivität der Ofenanlage aus.

⁷⁴ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 43

Flüchtige Bestandteile des Klinkerherstellprozesses sind folgende⁷⁵:

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| ○ Schwefeltrioxid | SO ₃ |
| ○ Kaliumoxid | K ₂ O (alkalisch) |
| ○ Natriumoxid | Na ₂ O (alkalisch) |
| ○ Chloride (Chlorwasserstoff) | HCl |

Am negativsten auf die Prozessstabilität wirkt sich erfahrungsgemäß der Chlorgehalt aus, da sein Eintrag die meisten Verstopfungen verursacht. Kunststoffabfälle sind die chlorhaltigsten Ersatzbrennstoffe. Die Obergrenzen für Chloreintrag sind daher in der Praxis eigens festzulegen.

7.4.5 Feuchtigkeit

Eine hohe Brennstofffeuchte wirkt sich negativ auf die Produktionsleistung aus, da durch eine unzureichende Verbrennung Rauchgase, insbesondere Kohlenmonoxid (CO), entstehen. Klinkerherstellung ist ein Stoffumwandlungsprozess, der aus Qualitätsgründen immer mit Luftüberschuss erfolgen soll. Demzufolge muss der Brennstoffausbrand auch vollständig sein. In diesem Zusammenhang ist das Kohlenmonoxid eine Kennzahl, welche die Vollständigkeit des Brennstoffausbrands definiert⁷⁶.

Das Kohlenmonoxid ist ein sogenanntes endothermes Gas. Bei einer endothermen Reaktion findet die chemische Reaktion nur statt, wenn die Wärme von außen zugeführt wird, während der Energieinhalt im System wächst⁷⁷. Im Pyroprozess findet folgende chemische Reaktion (Oxidation) statt:



Praktisch betrachtet hat eine Zunahme der Kohlenmonoxid-Konzentration zur Folge, dass die Temperatur in den unteren Zyklonstufen, wo die eigentliche Verbrennung stattfinden soll, sinkt und gleichzeitig in den oberen steigt. Damit gerät der Brennvorgang aus dem Gleichgewicht. Das entstandene Kohlenmonoxid steigt ebenso nach oben und reagiert dort mit Sauerstoff bzw. dem Wasserdampf, bei gleichzeitiger Freisetzung der Energie. Eine Energiefreisetzung kann unter solchen Umständen explosionsartig erfolgen – aus diesem Grund ist eine konstante Kontrolle der CO-Werte sehr wichtig.

⁷⁵ Vgl. Alsop, Chen, Tseng: Cement Plant Operations Handbook, S. 54-55

⁷⁶ Vgl. VDZ: Zement-Taschenbuch, S. 83

⁷⁷ Vgl. Kurzweil: Chemie : Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente, S. 124

7.4.6 Nebenkomponenten

Die Nebenkomponenten, wie zum Beispiel anorganische Elemente (Salze, Metalle) sowie die Asche des ausgebrannten Brennstoffs, beeinflussen die Zementchemie und Betriebsstabilität eher wenig, da sie größtenteils im Zementklinker eingebunden werden. Eine vorherige Kontrolle der chemischen Zusammensetzung des eingesetzten Ersatzbrennstoffs ist jedoch empfohlen, um die gewünschte Klinkerqualität zu aufrecht zu erhalten⁷⁸.

7.5 Maximal mögliche Substitutionsraten

Seitens des weltweit größten Zementproduzenten, des Lafarge-Konzerns, wurde eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, in denen die maximalen theoretischen und praktisch erprobten Substitutionsraten für diverse Ersatzbrennstoffe ermittelt wurden.

Die nachfolgenden Parameter beziehen sich nur auf die Applikation eines bestimmten Ersatzbrennstoffs, wobei man herausgefunden hat, dass eine ungeeignete Mischung verschiedener Ersatzbrennstofftypen das potentielle Maximum reduzieren kann⁷⁹:

Brennstofftype	Maximum		Dosierpunkt
	theoretisch möglich [%]	praktisch erreicht [%]	
Lösungsmittel	100	100	Hauptbrenner
Altöl	100	70	Hauptbrenner
	60	-	Wärmetauscher
ganze Reifen	30-50	18	Wärmetauscher
geschredderte Reifen	60	55	Wärmetauscher
Tiermehl	-	35	Hauptbrenner
Andere Biomasse	20	15	Hauptbrenner
	30	15	Wärmetauscher
Klärschlamm	20	17	Hauptbrenner
RDF	100	100	Wärmetauscher
	100	70	Hauptbrenner
Kunststoffe	100	100	Wärmetauscher
	100	70	Hauptbrenner

Tab. 11: Maximale theoretische und praktische Substitutionsraten

⁷⁸ Vgl. Larsen: Alternative Fuels in Cement Industry, S. 42

⁷⁹ Vgl. Denizeau, Stoerker, Demirtas, Landais, Shah, de Robert, Desseix, Hamm, Mc Quillan: Fuel Flexibility Study, S. 75

7.6 Spezifische Einflussfaktoren auf die Klinkerqualität

Allgemein betrachtet kann man sagen, dass eine schlechte Brennstoffverbrennung den größten Einfluss auf die Klinkerqualität besitzt. Durch interne Untersuchungen des Konzerns Lafarge wurden weitere spezifische Einflussfaktoren sowie die entsprechenden Empfehlungen für Gegenmaßnahmen ermittelt⁸⁰:

Ersatzbrennstoff	Kontroll-Parameter	Empfehlung
Lösungsmittel	Chlor (Cl)	Wenn der Chlorgehalt zu hoch ist, ist die Ofenbilanz nachzurechnen. Beispiel: 300 g Cl/Tonne Klinker ist bei kurzen Öfen kontrollierbar, 450 g Cl/Tonne Klinker für „Lepol“-Öfen und lange Öfen, darüber hinaus kann unter Umständen ein Chlor-Bypass notwendig sein.
Altreifen	Eisenoxid (Fe ₂ O ₃)	Bei höheren Substitutionsraten können die eingebauten Stahldrähte, Bildung von Eisenoxid Fe ₂ O ₃ verursachen und die Klinkerqualität beeinträchtigen. Dies wird durch die rötliche Farbe sichtbar. In diesem Fall sind Korrekturen der Rohmix-Chemie notwendig.
Siedlungsabfall geschreddert (RDF)	Chlor (Cl)	siehe Lösungsmittel
	Asche	Wenn der Aschegehalt (in %) zu hoch ist, sind bei höheren Substitutionsraten Korrekturen der Rohmix-Chemie notwendig.
Tiermehl	Phosphoroxid (P ₂ O ₅)	Lafarge empfiehlt einen Grenzwert von <0,5% P ₂ O ₅ im Klinker.
Andere Biomasse	Asche	Wenn der Aschegehalt (in %) zu hoch ist, sind bei höheren Substitutionsraten Korrekturen der Rohmix-Chemie notwendig.
Klärschlamm	Phosphoroxid (P ₂ O ₅)	Lafarge empfiehlt einen Grenzwert von <0,5% P ₂ O ₅ im Klinker.
	Asche	Wenn der Aschegehalt (in %) zu hoch ist, sind bei höheren Substitutionsraten Korrekturen der Rohmix-Chemie notwendig.

Tab. 12: Spezifische Einflussfaktoren auf die Klinkerqualität und Gegenmaßnahmen

⁸⁰ Vgl. Denizeau, Stoerker, Demirtas, Landais, Shah, de Robert, Desseix, Hamm, Mc Quillan: Fuel Flexibility Study, S. 71

7.7 Brennstoffabhängige Umweltemissionen

Das größte umwelttechnische Anliegen der Zementindustrie ist selbstverständlich eine weitere Reduktion der Schadstoff- sowie CO₂-Emissionen. Emissionen der Schwermetalle stellen ein weiteres Umweltproblem dar und müssen durch geeignete Maßnahmen und Voruntersuchungen kontrolliert werden. Zahlreiche Forschungsarbeiten haben folgende größte umweltbezogene Einflussfaktoren identifiziert⁸¹:

- Stickstoffoxid (NO_x)
- Kohlendioxid (CO₂)
- Schwefeloxid (SO₂)
- Schwermetallemissionen

Diese Emissionswerte sind in der nachstehenden Tabelle als Referenzparameter gegenüber der vergleichsweise ausschließlichen Verwendung von Kohle zusammengefasst. Aus dieser Bewertung geht eindeutig hervor, dass alle Ersatzbrennstoffe, bis auf sehr wenige Ausnahmen, einen positiven Umwelteffekt auslösen:

Kriterium	Alt-reifen	Tier-mehl	Klär-schlamm trocken	Siedlungs-Abfall	Kunst-stoff-Abfall	Biomasse (Reis-schalen)
NO _x - Emission	gleich	kleiner	kleiner	kleiner	gleich	kleiner
CO ₂ - Emission	kleiner um 10%	kleiner um 12%	kleiner - 0,88 Tonne/ Tonne Kohle ersetzt	kleiner	kleiner um 15%	kleiner
SO ₂ - Emission	größer	kleiner	größer	größer	kleiner	kleiner
Emissionen der Schwer-metalle	kleiner	-	gleich	größer	größer	kleiner

Tab. 13: Verringerung der CO₂-Emissionen durch Ersatzbrennstoffe versus Kohle

Wie man deutlich erkennen kann, wirkt sich deren Einsatz positiv auf die CO₂-Emissionen aus. Eine ähnliche Situation ergibt sich bei den NO_x-Emissionen, während bei Altreifen, Tiermehl und Klärschlamm eine etwas höhere SO₂-Emission zu erwarten ist.

⁸¹ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 95

Trotz aller erwähnten Umweltvorteile gibt es noch immer einige Forschungslücken hinsichtlich der Schadstoffemissionen, beispielsweise bei gemischter Verwendung von zwei oder mehreren Ersatzbrennstoffen (Brennstoff-Mix). Aus diesem Grund sollen weitere Anstrengungen unternommen werden, um die maximale Substitutionsrate zu erhöhen.

7.8 Kontrollmechanismen in der Anwendung

Um die Brennbarkeit des Ersatzbrennstoffes kontrollieren zu können, sind entsprechende Kontrollmechanismen notwendig. Die nachstehende Tabelle gibt Empfehlungen für Messpositionen sowie dazugehörige Messinstrumente, mit denen die Schwankungen des Brennprozesses kontrolliert werden sollen. Außerdem zeigt sie die zeitbezogenen Prioritäten diverser Kontrollmessungen sowie deren Reihenfolge⁸²:

KURZE Kontrollmessungen (Dauer ~ 10 Minuten)	notwendig	empfohlen	nach Bedarf
Flammentemperatur	X		
O ₂ im Ofen und am Austritt Wärmetauscher	X		
CO	X		
SO ₂		X ^(A)	
NO _x ^(B)	X		
Feuchtigkeitsgehalt des Brennstoffs			X
Korngröße des Brennstoffs ^(C)			X

LANGE Kontrollmessungen (Dauer ~ 8 Stunden)	notwendig	empfohlen	nach Bedarf
Heißmehl (SO ₃ + Cl)	1x täglich	3x täglich	
FeO		X	
C3S		X	
Schwefel/Alkali (S/A) - Verhältnis		X	

(A) Installation eines SO₂-Analysators auf der Ofenrückseite ist empfohlen wenn das Verhältnis S/A > 1,2 ist; Installation eines permanenten Analysators für Messungen von CO, O₂, NO_x und SO₂ ist dann obligatorisch wenn die Konzentration von SO₂ im Ofeneinlauf hoch ist (oft brennstoffabhängig z.B. Petrolkoks) **(B)** Falls eine SNCR-Anlage eingebaut ist, soll der Messpunkt für NO_x vor dem Eindüsungspunkt der SNCR-Anlage sein [SNCR=selektive nichtkatalytische Reduktionsanlage; ein Verfahren zur NO_x-Reduktion bei dem Harnstoff in das System eingedüst wird] **(C)** für feste und gröbere Brennstoffe im Ofenbrenner.

Tab. 14: Kontrollmessungen zur Überwachung der Prozessstabilität

⁸² Vgl. Denizeau, Stoerker, Demirtas, Landais, Shah, de Robert, Deseix, Hamm, Mc Quillan: Fuel Flexibility Study, S. 32 f.

7.9 Aktuelle Entwicklungen

7.9.1 Länderübergreifende und konzernspezifische Anwendungsvergleiche

Zementhersteller der westlichen Industriestaaten sind die Spitzenreiter in der Anwendung von Ersatzbrennstoffen. Aus diesem Grund gibt es dort auch mehr statistische Informationen im Vergleich zu den Entwicklungs- und Schwellenländern. Jedoch existieren auch im Westen große Unterschiede der Substitutionsraten zwischen den einzelnen Ländern.

Die meisten detaillierten Daten über die EBS-Nutzung sind in Österreich und Deutschland vorhanden. Hier sind Kunststoffabfälle, Altöle, Tiermehl und Reifen die beliebtesten Ersatzbrennstoffe.

Die folgende Tabelle zeigt den zusammenfassenden Status ausgesuchter Industrieländer, die im Laufe der Recherche gesammelt werden konnten (nach Höhe der Substitutionsrate sortiert)⁸³:

Land	Jahr	Substitution [%]
Niederlande	2011	85,0%
Österreich ⁸⁴	2014	75,5%
Deutschland ⁸⁵	2014	63,4%
Belgien	2011	60,0%
Schweden	2011	45,0%
Polen	2010	45,0%
Schweiz (Holcim-Werke)	2012	41,0%
Spanien	2011	22,4%
EU-28	2012	18,0%
Japan	2012	15,5%
USA	2004	8,0%
Australien	2013	7,8%

Tab. 15: Thermischer EBS-Gesamtenergieeinsatz einiger Industriestaaten

⁸³ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 87

⁸⁴ Vgl. VÖZ: Zement trägt Verantwortung : Nachhaltigkeitsbericht 2014, S. 16

⁸⁵ Vgl. VDZ: Zementindustrie im Überblick 2015, S. 11

Die nächste Tabelle fasst den prozentuellen Anteil einzelner Ersatzbrennstoffe, die bei den fünf weltführenden Zementkonzernen verwendet werden⁸⁶:

Ersatzbrennstoffe	Hersteller in [%]				
	Holcim	Cemex	Heidelberg	Italcementi	Lafarge
Altöl	5,0	-	3,7	8,5	22,1
Lösungsmittel und flüssige Abfälle	11,0	-	4,7	21,9	-
Altreifen	10,0	16,0	11,6	14,9	19,7
imprägnierte Sägespäne	6,0	-	-	-	-
Kunststoffabfälle	9,0	-	26,4	4,7	33,1
Industrie- und Siedlungsabfall (fest)	-	65,0	-	13,8	-
Industrieabfall und andere fossile Brennstoffe	30,0	-	-	-	-
Tiermehl	2,0	4,0	6,1	15,7	-
Landwirtschaftliche Abfälle	9,0	10,0	4,2	11,1	-
Hackschnitzel (Holz) und andere Biomasse-Abfälle	15,0	5,0	24,5	-	25,1
Klärschlamm (getrocknet)	2,0	-	4,2	1,7	-
RDF	-	-	-	7,8	-
Andere Ersatzbrennstoffe	-	-	14,6	-	-

Tab. 16: Ersatzbrennstoffanteile bei fünf weltführenden Zementherstellern

Daraus ist ersichtlich, dass Altreifen zwar bei allen Herstellern gern verwendet werden, andererseits aber auch Kunststoffabfälle, Industrie- und Siedlungsabfälle sowie die Biomasse in ihrer Gesamtheit sehr stark vertreten sind.

Zahlreiche Untersuchungen weisen darauf hin, dass keiner der oben genannten Ersatzbrennstoffe den gesamten Wärmebedarf erfüllen kann, sondern dass eine geeignete Brennstoffmischung zielführender ist. Diesbezüglich experimentieren die heutigen Zementhersteller an diversen Brennstoffkonzepten, um die Brennstoffkosten weiter zu senken.

Praktische Erfahrungen zeigen dass ein perfekter Brennstoff-Mix niemals im Voraus bestimmt werden kann. Eine optimale Zusammensetzung bedarf einer gründlichen chemischen und physikalischen Untersuchung, um ein optimales Verhältnis zu erreichen.

⁸⁶ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 88-95

7.9.2 Erfahrungsbericht Österreich

Was früher als Abfall bezeichnet wurde, ist in Österreich heute ein wiedergewonnener Energieträger, der eine gute finanzielle Basis für viele Unternehmen in der Abfallwirtschaft liefert.

Seit der gesetzlichen Einführung der getrennten Abfallsammlung vor ca. 25 Jahren haben die Bevölkerung und Industrie viel dazu beigetragen, dass durch Recycling oder kontrollierte Abfallverbrennung enorme Abfallmengen reduziert werden können. Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle sind die mit Abstand größte Fraktion, gefolgt von mechanisch aufbereiteten Abfällen und nicht gefährlichen Schlämmen⁸⁷.

Die Verbrennung von Abfällen ist umfassend durch die Abfallverbrennungsverordnung geregelt, die auf zwei Arten stattfindet⁸⁸:

- Verbrennungsanlagen: Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung, mit oder ohne Nutzung der entstehenden Verbrennungswärme
- Mitverbrennungsanlagen: Anlagen mit dem Hauptzweck der Energieerzeugung oder der Produktion stofflicher Erzeugnisse. Dazu gehören auch die Zementwerke.

In Österreich existieren 9 Zementwerke, die sich im europäischen Spitzenfeld der Abfallverbrennung befinden.



Abb. 31: Standorte der Zementwerke in Österreich ⁸⁹

⁸⁷ Vgl.: Böhmer, Kügler, Stoiber, Walter: Abfallverbrennung in Österreich, S. 42

⁸⁸ Vgl. <http://www.bmlfuw.gv.at/greentec/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-thermisch/Abfallverbrennung.html>, verfügbar am 27.11.2015

⁸⁹ Vgl. VÖZ: Zementherzeugung in Österreich, S. 3

Die Aufbereitung der Ersatzbrennstoffe in diesen Produktionsstätten wird aus Kostengründen meist durch den gemeinsamen Einkauf und konzerneigene Logistiker übernommen. In diesem Zusammenhang werden hier einige Erfahrungsberichte und Beispiele gebracht:

LafargeHolcim (Substitutionsrate 60-65%)⁹⁰: Die Belieferung der Zementwerke Retznei und Mannersdorf mit Ersatzbrennstoffen wird durch die Firma ThermoTeam durchgeführt, welche als Joint-Venture-Unternehmen vom Entsorgungsunternehmen Saubermacher und Lafarge gegründet wurde. Hier werden Produktionsabfälle, verwertbare Kunststoffabfälle sowie vorbehandelte Gewerbe- und Siedlungsabfälle zu einem definierten Brennstoff-Mix zusammengesetzt. Außerdem werden hier Altöle, Mais und Tiermehl zum Zwecke einer thermischen Verwertung gesammelt.

Wiietersdorfer & Peggauer (Substitutionsrate über 90%)⁹¹: Im Werk Wietersdorf wird ein sehr hoher Ersatzbrennstoff-Anteil als Mischung aus aufbereiteten Kunststofffraktionen, Bioschlamm, Klärschlamm, Holzspänen, Papierreject und Faserreststoffen verbrannt. Im Werk Peggau kommen zusätzlich Altöle und Lösungsmittel zum Einsatz⁹².

Leube Baustoffe (Substitutionsrate 77,4%)⁹³: In diesem Zementwerk wird eine Mischung aus Kunststoffabfall und Altreifen verwendet.

Kirchdorfer Zementwerk Hofmann (Substitutionsrate über 60%)⁹⁴: Das oberösterreichische Zementwerk verwendet einen Brennstoffmix aus Tiermehl, getrocknetem Klärschlamm, Holzspänen, Altreifen und Kunststoffabfall.

⁹⁰ Vgl. http://www.thermoteam.at/cms/front_content.php?idart=3&idcat=4&lang=1, verfügbar am 27.11.2015

⁹¹ Vgl. Sounders, Edwards: Global Cement Magazine; Global CemFuels focus Austria and Germany, S. 10

⁹² Vgl. <http://www.zement.wup.at/746.0.html>, verfügbar am 25.11.2015

⁹³ Vgl. Sounders, Edwards: Global Cement Magazine; Global CemFuels focus Austria and Germany, S. 10

⁹⁴ Ebenda, S. 12

7.9.3 Erfahrungsbericht Deutschland

Wie vom Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) berichtet wird, hat die deutsche Zementindustrie im Jahr 2014 eine durchschnittliche EBS-Substitutionsrate von 63,4% erreicht⁹⁵:

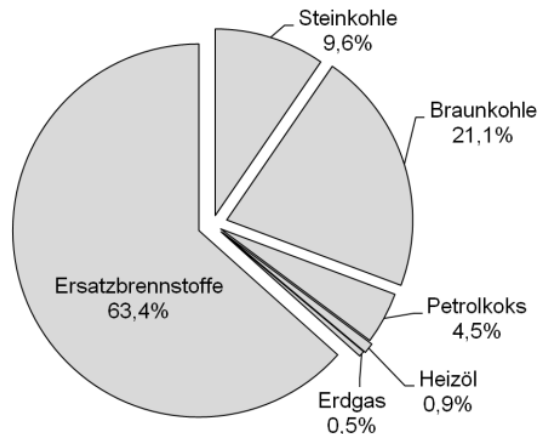


Abb. 32: Energieträger im Brennstoff-Mix der deutschen Zementwerke in 2014

Industrie- und Gewerbeabfälle sind in Deutschland die am häufigsten verwendeten Ersatzbrennstoffe, während Siedlungsabfälle, Klärschlamm und Altreifen eine ebenso bemerkenswerte Nachfrage besitzen. Es existieren rund 150 Abfallaufbereitungsanlagen, welche die hergestellten Ersatzbrennstoffe an die 33 Zementwerke sowie andere kalorische Kraftwerke liefern⁹⁶.

Die anfängliche Überproduktion von RDF hatte zu großen Exportmengen in die Nachbarländer geführt. Dennoch entwickelte sich der Markt für Siedlungsabfälle zu mehr Wettbewerb in den letzten Jahren, was reduzierte Lieferungen und höhere Preise zur Folge hatte.

Heutzutage gibt es auch indirekte politische Faktoren, welche die künftige Belieferung der Ersatzbrennstoffe an die Zementindustrie beeinflussen können, nämlich die Entscheidung der Bundesregierung, die neun verbleibenden Kernkraftwerke nach der Fukushima-Atomkatastrophe, bis 2022 zu schließen. Durch diesen Schnellentschluss der deutschen Politik ist davon auszugehen, dass die Energielücke durch den Bau neuer Kohlekraftwerke ersetzt wird. Es bleibt abzuwarten, ob sich dies auf die Zementhersteller auswirken könnte, da die Produktion der brennbaren Abfälle mehrheitlich in den Stromsektor gehen könnte⁹⁷.

⁹⁵ Vgl. VDZ: Zementindustrie im Überblick 2015, S. 10

⁹⁶ Vgl. Sounders, Edwards: Global Cement Magazine; Global CemFuels focus Austria and Germany, S. 12

⁹⁷ Vgl. VDZ: Zementindustrie im Überblick 2013, S. 10

7.9.4 Erfahrungsberichte einiger Westbalkan-Länder

Die kroatische Abfallwirtschaft gilt heute zwar als krisenresistent und gewinnträchtig, jedoch ist der Aufholbedarf immer noch enorm. Mitte 2013 wurde ein strenges Entsorgungsgesetz verabschiedet. Dennoch ist zu erwarten, dass bis zu seiner vollständigen gesellschaftlichen Anpassung, von der getrennten Sammlung bis zum fertigen Ersatzbrennstoff, viel Zeit vergehen wird.

Viele Bereiche, in denen die ökologischen und technischen EU-Standards vorgeschrieben werden, sind noch immer weit davon entfernt. Veraltete Aufbereitungsanlagen und unzureichendes Know-how, aber auch die Bürokratie sind die derzeitigen Bremsen für den wirtschaftlichen Aufschwung in diesem Industriezweig⁹⁸. Eine Steigerung des abfallwirtschaftlichen Kreislaufs, nämlich einen höheren Ersatzbrennstoffanteil für die Zementindustrie zu erreichen, hängt sehr stark auch mit dem Abfall-Recycling zusammen. In Kroatien werden derzeit nur 16% der Siedlungsabfälle recycelt.

Auch in Rumänien herrscht beispielsweise eine ähnliche Situation, obwohl das Land bereits im Jahr 2008 eine gesetzlich getrennte Abfallentsorgung eingeführt hat.

Trotz aller Schwierigkeiten sind in beiden Ländern langsame Fortschritte sichtbar. Ein erfolgsversprechendes Kriterium ist die Einführung der getrennten Müllsammlung. Besonders seit dem EU-Beitritt dieser beiden Länder gibt es bereits einige profitable Recycling-Unternehmen, die den Abfall erfolgreich aufbereiten und an seine Kunden verkaufen.

Außerdem werden seitens der Regierungen weitere Anstrengungen unternommen, bewusstseinsbildende Umweltschutzprogramme für die Bürger oder an den Schulen auszuarbeiten, mit denen auf die besondere Wichtigkeit einer getrennten Müllsortierung hingewiesen wird.

Laut einer Vorgabe der Europäischen Union muss in Rumänien 50% des Siedlungsabfalls bis zum Jahr 2020 recycelt werden. Diese hohe Bedingung und die aktuelle Realität von derzeit nur 15-17% stellen das Land vor gewaltige, aber nicht unerfüllbare Herausforderungen.

⁹⁸ Vgl. Miljković, Marijana: Neue Wege für Kroatiens Müll. In: Wirtschaftsblatt Österreich. 08.01.2014.

Die Erfüllung dieser Kriterien bedarf einer umfassenden Änderung des Bewusstseins sowie der Verbesserung der gesamten Kette – von der Sammelstelle bis zur endgültigen Verwertung⁹⁹.

7.10 Zusammenfassende Vor- und Nachteile der Anwendung

Eine Senkung der Kosten ist die erste treibende Kraft für Veränderungen und Investitionen in dieser energieintensiven Industrie. Die heutigen Zementhersteller sind sich der Tatsache bewusst, dass die Ersatzbrennstoffe aufgrund ihrer Einkaufskosten gegenüber den fossilen Brennstoffen meist günstiger sind. Jedoch muss ihr Einsatz in einem technologisch optimierten Verhältnis erfolgen.

Volkswirtschaftlich betrachtet trägt die Anwendung der EBS zur Schonung nichterneuerbarer Energieressourcen, dem Umweltschutz sowie der Vermeidung von Abfalldeponierung bei. Außerdem besitzen die Drehrohröfen das alkalische (bindende) Verhalten, bei dem durch die langen Verweilzeiten und hohen Temperaturen viele Schadstoffe (z.B. Schwermetalle) in den Klinker eingebunden und dadurch nicht emittiert werden.

Weiters können sie in manchen Fällen sogar als Rohmaterialzusatz dienen. Beispielsweise können durch Stahldrähte bei den Altreifen, bestimmte Mengen an verfahrenstechnisch notwendigem Eisen im Rohmaterial ersetzt werden.

Es ist oft schwierig, einen geeigneten Ersatzbrennstoff zu finden, da seine Anwendung von einigen chemischen und betriebsspezifischen Faktoren abhängig ist. Aus diesem Grund greift man vermehrt zu maßgeschneiderten Lösungen, bei denen durch bestimmte Brennstoff-Gemische optimale Prozessbedingungen erreicht und kontrolliert werden können.

⁹⁹ Vgl. HRT (Hrvatska Radio Televizija): Paralele : Europski magazin. - HRT. 13.02.2015, 21:10 Uhr (Sendung Nr. 236). - Fernsehbericht

Die folgende Tabelle zeigt eine zusammenfassende Auflistung von Vor- und Nachteilen einiger praktisch getesteter Ersatzbrennstoff-Typen¹⁰⁰:

Kriterium	Ersatzbrennstoff					
	Altreifen	Tiermehl	Klärschlamm trocken	Siedlungs-Abfall	Kunststoff-Abfall	Biomasse (Reisschalen)
Heizwert (MJ/kg)	35,6	14,47	15,28	15,4	29-40	14-21
Feuchte (%)	0,62	6	variiert	31,2	variiert	6-12
Verfügbarkeit	hoch	mittel	hoch	hoch	hoch	mittel
NO _x Emission	gleich	kleiner	kleiner	kleiner	gleich	kleiner
CO ₂ -Emission	kleiner um 10%	kleiner um 12%	kleiner - 0,88 Tonne/Tonne Kohle ersetzt	kleiner	kleiner um 15%	kleiner
SO ₂ -Emission	größer	kleiner	größer	größer	kleiner	kleiner
Emissionen der Schwermetalle	kleiner	-	gleich	größer	größer	kleiner
Maximale Substitutionsrate (von gesamt)	30%	40%	5%	30%	-	20%
Lagerungskosten	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	niedrig
Einfluss auf Klinkerqualität	gleich	niedrig	niedrig	niedrig	mittel	-
Investitionskosten	niedrig	mittel	hoch	mittel	mittel	niedrig

Tab. 17: Anwendungsauswirkungen diverser Ersatzbrennstoffe versus Kohle

Diese praktischen Anwendungen können zusätzlich durch die Einflussfaktoren der brennstoffbezogenen Umweltemissionen ergänzt werden, die bereits im Kapitel 7.7 beschrieben wurden.

Die obere Tabelle zeigt im Besonderen folgende Vor- und Nachteile:

- Altreifen und Biomasse sind aufgrund ihrer niedrigen Betriebskosten und großer Substitutionsraten die attraktivsten Ersatzbrennstoffe für die Zementhersteller.
- Der thermische Einsatz von Altreifen ist trotz ihrer hohen Beliebtheit auf 30% begrenzt da er sich negativ auf die Zementchemie (Betonaushärtung) auswirkt.
- Lösungsmittel und Altöle haben den höchsten Heizwert aller Ersatzbrennstoffe. Außerdem können sie, anders als bei Siedlungsabfällen, Tiermehl oder getrocknetem Klärschlamm, ohne Vorbehandlung und direkt dem Brennprozess zugeführt werden.

¹⁰⁰ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 95

- Siedlungsabfall und Tiermehl haben zwar die höchste Verfügbarkeit, jedoch sind sie für die Aufbereitung anspruchsvoller, da sie einen relativ hohen Feuchtigkeitsgrad aufweisen und daher getrocknet werden müssen.
- Biomasse ist aus umwelttechnischer Sicht zwar die beste Option, jedoch ist ihre Verfügbarkeit saisonal beschränkt und deswegen nur teilweise einsetzbar.
- Getrockneter Klärschlamm hat den niedrigsten Heizwert. Andererseits ersetzt seine Asche das Rohmaterial selbst, was einen Pluspunkt darstellt.

Wie man sieht, liefert diese Auflistung kein eindeutiges Ergebnis darüber, welcher Ersatzbrennstoff am besten geeignet ist. Viele technologische, ökologische, wirtschaftliche und soziale Kriterien beeinflussen die Entscheidung zu einer treffenden Auswahl.

Die Umstellung von konventionellen auf alternative Energiequellen stellt die Produzenten vor einige Herausforderungen, da dieser Brennmechanismus vollkommen andere Eigenschaften aufweist. Schlechtere Wärmeverteilung, instabile Betriebsbedingungen, Verklebungen in Zyklonen und Steigleitungen, höhere Schadstoffkonzentrationen und staubige Ofenanlagen sind einige Faktoren, die die Betriebssicherheit beeinflussen können. Auch ein möglicher Einfluss auf die Klinkerqualität durch die eingebundenen Verbrennungsrückstände ist dabei nicht zu vernachlässigen. Denn wenn nur eine der Verbindungen oder Elemente die Zementqualität beeinflussen sollte, sind die erwähnten Kostenvorteile bedeutungslos. Außerdem erfordert eine Umstellung auf die Ersatzbrennstoff-Mitverbrennung oft hohe, anlagenbedingte Investitionen, da diese Brennstoffe eigene Förder- und Dosiersysteme, Brandschutzmaßnahmen sowie Lagerungen benötigen.

Nichts desto trotz führt bei einer sachgemäßen und gut überlegten Auslegung kein Weg mehr an Ersatzbrennstoffen vorbei. Durch die absolut nachgewiesene Wirtschaftlichkeit der Anwendung verfolgt die moderne Zementindustrie einen weiteren Ausbau und eine kontinuierliche Steigerung der Substitutionsraten. Die anfänglich hohen Investitionen amortisieren sich relativ rasch und gehen mittelfristig in den Plusbereich über.

Eine Möglichkeit zur annähernden Bestimmung der Ersatzbrennstoff-Substitutionsrate kann beispielsweise die Durchführung einer Entscheidungsanalyse sein, wobei die Kriterien aus den Tabellen 11 und 18 entsprechend betrachtet und nach bestimmter Gewichtung analysiert werden.

8 Wichtige Kriterien für die Ermittlung einer Investitionsentscheidung

8.1 Spezifische Anlageneigenschaften

Um die Anwendungsdurchführbarkeit innerhalb einer bestehenden Produktionsanlage zu bewerten sind folgende Kriterien ausschlaggebend:

- Verbrennungsqualität des Ersatzbrennstoffs
- Stabilität seiner Verbrennung
- Spezifische Besonderheiten der Produktionsanlage

Als spezifische Besonderheiten der Produktionsanlage werden im Allgemeinen folgende Gegebenheiten verstanden:

- Chemische Zusammensetzung des Rohmaterials (zum Beispiel sein Eisengehalt bei gleichzeitiger Verbrennung von Altreifen)
- Konstruktive Gegebenheiten (Fördersysteme, Position und Entfernung zwischen Brennstofflager und Aufgabepunkt, bestehendes Brennerdesign, Länge des Kalzinators usw.)

Eine spezifische Besonderheit der Anlage kann beispielsweise ein ungünstig liegender Dosierpunkt sein, wenn dadurch kein vollständiges Ausbrennen erreicht und folglich Kohlenmonoxid gebildet wird.

Um die Wirtschaftlichkeit der Anwendung zu überprüfen, ist es daher zielführend, vor der Durchführung einer detaillierten Brennstoffuntersuchung auch diese Voraussetzungen in Betracht zu ziehen¹⁰¹.

8.2 Ermittlung des geeigneten Ersatzbrennstoffes

In der Zementindustrie existieren derzeit keine typischen Auswahlkriterien für die Ersatzbrennstoffe. Die meisten spezifischen Kriterien werden normalerweise von den jeweiligen Zementherstellern selbst und nach den eigenen Standards festgelegt.

¹⁰¹ Vgl. Denizeau, Stoerker, Demirtas, Landais, Shah, de Robert, Desseix, Hamm, Mc Quillan: Fuel Flexibility Study, S. 7

8.2.1 Vorbedingungen für eine erfolgreiche Selektion

Folgende Auswahlkriterien können als typisch bezeichnet werden¹⁰²:

- Aggregatzustand des Brennstoffs (fest, flüssig oder gasförmig)
- Physikalische Eigenschaften (Dichte, Homogenität, möglichst gleichbleibende Korngröße, Aufbereitungsstatus bzw. ob Metall, Glas o.ä. aussortiert sind)
- Heizwert (Werte über 14 MJ/kg bzw. 3350 kcal/kg sind in Ordnung)
- Feuchtigkeitsgehalt
- Dosierbarkeit des Ersatzbrennstoffs
- Verfügbarkeit
- Toxizität (organische Verbindungen, Schwermetalle)
- Aschegehalt
- zu erwartende Emissionsmengen
- möglicher Einfluss auf die Zementqualität
- Einkaufskosten gegenüber den fossilen Brennstoffen
- Menge an flüchtigen Bestandteilen (Chlor, Schwefel usw.)

Vor allem die Konzentration von Chlor ist hierfür von großer Bedeutung, die am besten durch die Analyse des Heißmehles kontrolliert wird. Außerdem kann die Ansatzbildung im Ofeneinlaufbereich aufgrund des Verhältnisses Chlor-Schwefel vorhergesagt werden, was in einem vom Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) erstellten Diagramm ersichtlich ist. Erfahrungswerte zeigen, dass man damit zwar relativ einfach eine Vorhersage treffen kann – die absolute Höhe des Problems aber natürlich nicht.

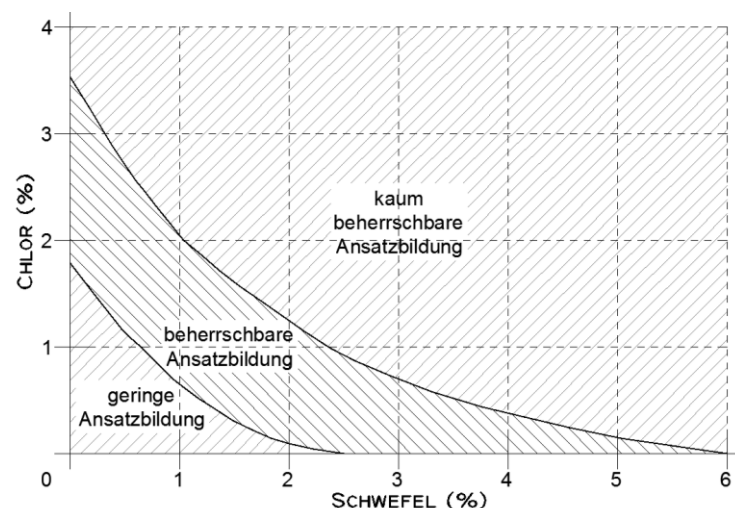


Abb. 33: Ansatzbildung in Abhängigkeit vom Verhältnis Chlor/Schwefel im Heißmehl ¹⁰³

¹⁰² Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 87-88

¹⁰³ Vgl. Schöffmann: Gas-Bypass-Anlagen zur Beherrschung von Chlorid-Kreisläufen im Zementwerk, S. 6

Eine gleichbleibende Produktionsqualität setzt ebenso voraus, dass der Ersatzbrennstoff gleichmäßig und vollständig ausbrennt sowie die jeweilige Korngröße dem jeweiligen Aufgabepunkt (siehe auch Kapitel 4.2 Aufbereitung) entspricht.

Die vollständige Ausbrennzeit fester Ersatzbrennstoffe, in Abhängigkeit von ihrer Korngröße, ist der folgenden Tabelle zu entnehmen:

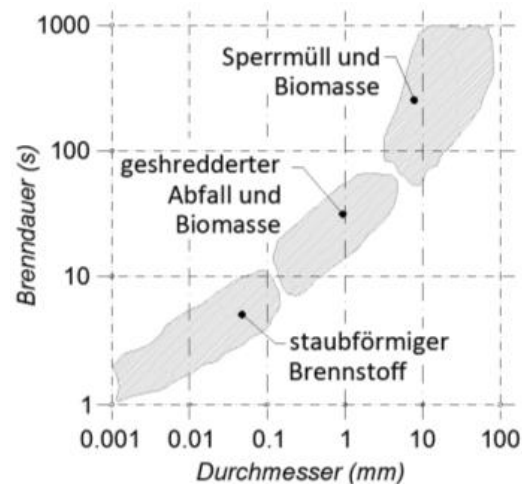


Abb. 34: Auswirkung der Korngröße auf die Brenndauer ¹⁰⁴

8.2.2 Ermittlung des Heizwertes

Die nachstehende Tabelle fasst die wichtigsten Untersuchungsergebnisse meistverwendeter Ersatzbrennstoffe und ihren Vergleich mit dem konventionellen Brennstoff, Kohle, zusammen. Solche Analysen stellen außerdem einen frühen Indikator in Bezug auf die Umweltemissionen dar, verursachen beispielsweise Ersatzbrennstoffe mit höherem Schwefelanteil höhere Schwefelemissionen.

Außerdem gibt die Tabelle den Hinweis auf die Menge der Verbrennungsrückstände, die im Klinker verbleiben werden. Die Analyse dieser Rückstände (Asche) ist umso wichtiger, damit eine eventuelle Auswirkung auf die Klinkerqualität überprüft werden kann.

¹⁰⁴ Vgl. Jensen: F.L. Smidth calciner concept - Fachpräsentation, S. 5

Die dargestellten Heizwerte dienen der Berechnung einer entsprechenden Substitutionsrate¹⁰⁵:

Brennstoff	Kohle	Alt-Reifen	Tiermehl	Klär-schlamm trocken	Siedlungs-abfall	Kunststoff-abfall	Biomasse (Reisschalen)
Feuchte	3,0	0,62	6,8	0,2	31,2	0,01	9,96
Asche	11,1	4,78	34,4	20,2	35,17	0,45	20,61
Kohlenstoff	70,6	83,87	35,3	52,5	34,88	84,65	34,94
Wasserstoff	4,3	7,09	4,9	6,4	4,65	13,71	5,46
Stickstoff	1,2	0,24	8,4	9,2	1,02	0,65	0,11
Schwefel	1,3	1,23	0,5	0,8	0,15	0,01	-
Sauerstoff	11,8	2,17	-	31,1	23,11	0,95	38,86
Chlor	0,07	0,149	0,26	-	1,02	0,03	-
LHV - unterer Heizwert [MJ/kg]	27,4	-	13,06	-	15,4	29-40	13,5
HHV - oberer Heizwert [MJ/kg]	28,4	37,8	14,19	25,5	-	-	-

Tab. 18: Heizwert-, Asche- und Elementaranalyse wichtigster Ersatzbrennstoffe

Hinweis: Im Zuge dieser Recherche habe ich festgestellt, dass sich die oben angegebenen Analyseergebnisse für Altreifen, Tiermehl und Siedlungsabfall mit den Zahlen aus der Tabelle 8 unterscheiden. Diese aus zwei verschiedenen Literaturquellen stammenden Differenzen sind meiner Meinung nach auf den momentanen Zustand des untersuchten Brennstoffs zurückzuführen, da die Ersatzbrennstoffqualität bekannterweise variieren kann. Diese Feststellung bekräftigt die Notwendigkeit periodischer Brennstoffanalysen.

¹⁰⁵ Vgl. Rahman, Rasul, Khan, Sharma: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process, S. 94

8.3 Eingrenzung des Investitionsaufwands

Der weltweit größte Zementproduzent Lafarge hat im Laufe der letzten Jahrzehnte viel Erfahrung auf dem Gebiet der Ersatzbrennstoff-Anwendung gesammelt. In Hinblick auf die Anlieferung, Aufbereitung, Lagerung und Dosierung der Ersatzbrennstoffe wurde eine Gruppeneinteilung definiert, aus der Empfehlungen zur Eingrenzung des Investitionsaufwands hervorgehen.

Demzufolge werden Installationen in drei Hauptgruppen eingeteilt¹⁰⁶:

- Typische Installation: Darunter sind bereits erprobte und sichere Technologien zu verstehen.
- Minimale Installation: Technologien mit notwendigsten Maschinen und einfachen Kontrollmechanismen sowie wenig Automation. Solche Installationen erfordern in der Regel einen hohen Personalbedarf, um einen sicheren und kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten. Sie können zu einer typischen Installation aufgebaut werden (Upgrade).
- Installation nach „Stand der Technik“: Diese Installationen sind zwar in der Vorlaufphase kostenintensiv, amortisieren sich dafür relativ bald. Sie sind nur für etablierte Zementmärkte empfohlen, die bereits stabile und langfristige Betriebsverhältnisse besitzen.

¹⁰⁶ Vgl. Denizeau, Stoerker, Demirtas, Landais, Shah, de Robert, Desseix, Hamm, Mc Quillan: Fuel Flexibility Study, S. 8

9 Dynamische Berechnung der Investitionswirtschaftlichkeit

9.1 Ermittlung der max. Substitutionsrate nach Hurwicz-Regel

Zur Durchführung analytischer Entscheidungen existieren heute unterschiedliche Techniken, die nach bestimmten Regeln abgehandelt werden. Diverse Einflussfaktoren, die zur Bestimmung der maximalen Ersatzbrennstoffmenge von Bedeutung sind, wurden in den früheren Kapiteln diskutiert. Diesbezüglich ist wesentlich zu erwähnen, dass diese Faktoren stets betriebsspezifisch sind und ihre Priorität sowie Risikoeinschätzung subjektiv bewertet werden muss.

In diesem Zusammenhang dient die Hurwicz-Regel lediglich als ein Instrument zur Eingrenzung zwischen möglichen Entscheidungen. Diese Regel wird in der Planungs- und Entscheidungstheorie als „Umweltsituation unter Ungewissheit“ bezeichnet, da die objektiv betrachtete Eintrittswahrscheinlichkeit für gewisse Einflussfaktoren nicht zu 100% gewährleistet sein kann¹⁰⁷.

Als Beispiel dafür können variierende Brennstoffqualitäten oder seine unsichere langfristige Verfügbarkeit genannt werden.

Mit der Anwendung dieser Entscheidungsregel soll ein angenähertes Optimum zwischen der maximalen Substitutionsmenge und den für die Betriebssicherheit relevanten Einflussfaktoren ermittelt werden, was aus meiner Sicht am ehesten mit der Hurwicz-Regel erreicht werden kann. Sie wird aus zwei voneinander gegensätzlichen Regeln kombiniert:

- Die MaxiMin-Regel (Waldregel): diese Entscheidungsregel bevorzugt jene Anwendung, die das maximale Minimum bringt. Unter dieser „pessimistischen“ Betrachtung wird eine bestimmte Ersatzbrennstoffmenge bevorzugt, die das minimalste Anwendungsrisiko darstellt.
- Die MaxiMax-Regel: diese Entscheidungsregel regelt das maximale Maximum bzw. es wird unter „optimistischen“ Bedingungen ermittelt, wie groß der Ersatzbrennstoff-Einsatz maximal sein kann¹⁰⁸.

¹⁰⁷ Vgl. Stelling: Vorlesungsskript Planungs- und Entscheidungsmethoden : Semester 3, S. 92

¹⁰⁸ Ebenda, S. 99

Die aus den beiden individuellen Entscheidungsregeln ermittelten Ergebnisse werden letztendlich in einer Matrix zusammengefasst und mittels des Sicherheitsfaktors „Lambda“ (λ) zum endgültigen Ergebnis, dem sogenannten Hurwicz-Maß, gebracht.

Um dies näher zu verdeutlichen, möchte ich an dieser Stelle gerne ein praktisches Beispiel anführen:

ZIELSETZUNG: Ermittlung der maximal vertretbaren Substitutionsrate eines Ersatzbrennstoffgemischs, bestehend aus Siedlungsabfall und Kunststoff, mittels der Hurwicz-Regel.

LÖSUNGSWEG: Diese Ermittlung wird in vier Lösungsschritten durchgeführt:

SCHRITT 1: In dieser Phase werden Daten, die für eine subjektive Entscheidungsfindung relevant sind, in einer Tabelle zusammengefasst. Jeder Einflussfaktor erhält eine aktuelle und prognostizierte Zustandsbewertung in Abhängigkeit zur angestrebten Substitutionsrate (Aktion):

		SCHRITT 1: Basistabelle erstellen, Zustandsbewertung								
		Brennstoff- Verfügbarkeit	Heizwert [MJ/kg]	Chemie und Menge entsprechen den Besonderheiten der Anlage?	Schadstoff- Emissionen	Einfluss auf die Zementqualität	Einsparungspotential gegenüber Kohle [EUR / ton]	Logistische Herausforderung	Modifikation der Produktionsanlage notwendig?	Investitionsaufwand
thermische Substitutionsrate	≤ 15 %	hoch	21	hoch	niedrig	keine	8	niedrig	niedrig	niedrig
	≤ 30 %	hoch	21	hoch	niedrig	keine	16	niedrig	mittel	mittel
	≤ 50 %	mittel	21	hoch	niedrig	keine	27	mittel	hoch	mittel
	> 50 %	niedrig	21	mittel	mittel	möglich	48	hoch	hoch	hoch

SCHRITT 3b: maximales Maximum ermitteln (Optimismus)		Brennstoff- Verfügbarkeit	Heizwert [MJ/kg]	Chemie und Menge entsprechen den Besonderheiten der Anlage?	Schadstoff- Emissionen	Einfluss auf die Zementqualität	Einsparungspotential gegenüber Kohle [EUR / ton]	Logistische Herausforderung	Modifikation der Produktionsanlage notwendig?	Investitionsaufwand
thermische Substitutionsrate	≤ 15 %	10	10	10	10	10	3	10	10	10
	≤ 30 %	10	10	10	10	10	5	10	6	7
	≤ 50 %	7	10	10	10	10	7	6	3	8
	> 50 %	3	8	7	6	8	10	2	3	4
Legende:		0 bedeutet sehr schlecht – 10 bedeutet sehr gut								

SCHRITT 4: Die Zahlenwerte der beiden Entscheidungsregeln werden durch die im Voraus definierte Abschlusstabelle gegenübergestellt und mittels des Lambda-Faktors zum Ergebnis gebracht:

SCHRITT 4: Gegenüberstellung der Minima und Maxima; Ergebnis- Ermittlung		maximales MAXIMUM	maximales MINIMUM	$\lambda \cdot \text{MAXIMUM}$ (A)	$(1-\lambda) \cdot \text{MINIMUM}$ (B)	Hurwicz- Maß (A)+(B)	Anmerkung
thermische Substitutionsrate	≤ 15 %	10	3	7	0,9	7,9	
	≤ 30 %	10	5	7	1,5	8,5	SIEGER
	≤ 50 %	10	3	7	0,9	7,9	
	> 50 %	10	2	7	0,6	7,6	
Legende:		$\lambda > 0,5$ bedeutet Optimismus; $\lambda < 0,5$ bedeutet Pessimismus (für diesen Anwendungsfall wurde 0,7 gewählt)					

Durch die Ermittlung des maximalen Minimums (Pessimismus, Risikominimierung), des maximalen Maximums (Optimismus, Wirtschaftlichkeit der Ersatzbrennstoffe) sowie der zusätzlichen Einbeziehung des Lambda-Faktors, lässt sich eine Kompromisslösung finden.

ERGEBNIS: Die maximal vertretbare thermische Substitutionsrate für den gewählten Ersatzbrennstoff-Mix ist auf **30%** festgelegt.

9.2 Bestimmung der weiteren Eingabedaten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Um einen Investitionsaufwand wirtschaftlich zu betrachten, ist es im Vorfeld wichtig, bestehende Produktionsdaten und neue relevanten Daten des zu substituierenden Ersatzbrennstoffs zu ermitteln. Sie werden in folgende Gruppen gegliedert:

- 1) Bestehende Daten der Produktionsanlage:
 - Klinkerproduktion [Tonnen/Stunde]
 - Betriebszeiten [Stunden/Tag und Tage/Jahr]
 - Heizwert des fossilen Brennstoffs [kcal/kg oder MJ/kg]; $1\text{ MJ} \approx 238\text{ kcal}$
 - Einkaufspreis des fossilen Brennstoffs [EUR/Tonne]
 - Spezifischer Brennstoffverbrauch [kcal/kg Klinker]
- 2) Neue Daten für den gewählten Ersatzbrennstoff-Mix:
 - Heizwert des Ersatzbrennstoffs [kcal/kg oder MJ/kg]; $1\text{ MJ} \approx 238\text{ kcal}$
 - Einkaufs- (extern) oder Herstellpreis (intern) des Ersatzbrennstoffs [EUR/Tonne]
- 3) Finanzierungskosten:
 - Projekt-Installationskosten; als Barwert ohne Verzinsung [EUR]
 - Fremdfinanzierungskosten durch Kreditlaufzeit [Jahre] und Verzinsung [%]. Zur Berechnung werden gleichbleibende Annuitätsraten des Endwertes verwendet
- 4) Betriebskosten:
 - Fixkosten: Personal, Wartung, Versicherung [EUR/Jahr]
 - Variable Kosten: Stromverbrauch, Rückstellungen [EUR/Jahr]

Der prognostizierte Restwert [%] am Ende einer bestimmten Nutzungsdauer [Jahre] wird zur Berechnung der Amortisationszeit [Jahre] verwendet.

Hinweis: die oben genannten Eingabedaten sind in der Wirtschaftlichkeitstabelle extra durch kursive Schriftart gekennzeichnet. Alle anderen Zahlenwerte sind berechnet worden.

9.3 Auflistung der zu verwendenden finanzmathematischen Formeln

Im nachfolgenden Text folgt die Auflistung aller verwendeten finanzmathematischen Formeln zur Berechnung der dynamischen Wirtschaftlichkeit.

FORMEL 1: Berechnung der Finanzierungskosten (Kreditkosten)¹⁰⁹:

Hierfür wird die Berechnung des Endwertes angewendet. Der Endwert ergibt sich durch die Aufzinsung der Investitionssumme:

$$K_n = K_0 \cdot (1 + i)^n$$

K_n = Endwert (Summe am Ende der Kreditlaufzeit)

K_0 = Barwert (Anschaffungssumme)

i = Zinssatz (z.B. für 5% wird der Wert 0,05 in die Formel eingesetzt)

n = Kreditlaufzeit

FORMEL 2: Berechnung der Amortisationszeit zur Bestimmung der Vorteilhaftigkeit einer Investition¹¹⁰:

$$tw = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{durchschnittlicher Rückfluss}} = \frac{\text{Finanzierungskosten } (a_0) - \text{Restwert } (Rw)}{\text{Gewinn} + \text{Abschreibung } Afa}$$

Zu dieser Berechnung werden folgende Annahmen bzw. Einzelkalkulationen eingesetzt:

- Finanzierungskosten a_0 werden dem Endwert K_n gleichgesetzt (= Kreditsumme zur Finanzierung des Projektes)
- Der Restwert Rw am Ende der Nutzungsdauer wird in der Wirtschaftlichkeitsberechnung mit 15% angenommen und wie folgt berechnet:

$$Rw = K_n \cdot 15\%$$

- als Gewinn wird die Einsparung von Brennstoffkosten und Betriebskosten betrachtet:

$$\text{Gewinn} = \text{Brennstoffkosten} - \text{Betriebskosten}$$

- die lineare Abschreibung Afa wird wie folgt berechnet:

$$Afa = \frac{\text{Kapitaleinsatz}}{\text{Nutzungsdauer}}$$

¹⁰⁹ Vgl. Ertl: Vorlesungsunterlagen Investitionswirtschaft : Semester 1, S. 153

¹¹⁰ Ebenda, S. 123-125

FORMEL 3: Berechnung der Kenngröße Wirtschaftlichkeit¹¹¹:

Mit dieser Berechnung wird die Frage beantwortet, ob die Investition gerechtfertigt ist.

Man spricht von einer Wirtschaftlichkeit, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{\text{Ertrag}}{\text{Aufwand}} > 1$$

bzw.

$$\frac{\text{Leistung}}{\text{Kosten}} > 1$$

Erklärungen:

Ergebnis > 1 bedeutet wirtschaftlich

Ergebnis < 1 bedeutet unwirtschaftlich (Verlust)

Ergebnis = 1 bedeutet kostendeckend

Das positive Verhältnis der Erträge über die Aufwendungen (Kosten) sichert die langfristige Überlebensfähigkeit des Unternehmens. Im praktischen Teil der nachfolgenden Berechnung wird die Wirtschaftlichkeit aus der Sicht der Kosten (KW als Kostenwirtschaftlichkeit) beurteilt:

$$W = \frac{\text{Sollkosten}}{\text{Istkosten}} = \frac{\text{Brennstoffkosten}_{\text{ALT}}}{\text{Brennstoffkosten}_{\text{NEU (kombiniert)}} + \text{Betriebskosten} + \text{Rückzahlungsraten}}$$

FORMEL 4: Berechnung der Kenngröße Rentabilität¹¹²:

Neben der Wirtschaftlichkeit wird die Rentabilität als weiteres Erfolgsziel einer Investition betrachtet. Die Rentabilität ist das Verhältnis von Gewinn aus einer Investition und dem durchschnittlich eingesetzten Kapital:

$$\text{Rentabilität (\%)} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Kapitaleinsatz}} = \frac{\text{Gewinn durch Einsparung der Brennstoffkosten}}{\text{Rückzahlungsraten} + \text{Betriebskosten}}$$

¹¹¹ Vgl. Voegelé, Sommer: Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure, S. 332-341

¹¹² Vgl. Ebenda, S. 353-356

9.4 Tabellarische Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

	Einheit		
Thermische Substitutionsrate	%	0	30

BESTEHENDE PRODUKTIONS DATEN:			
Klinkerproduktion	Tonnen/Std.	85	85
	Tonnen/Tag	2.040	2.040
Betriebszeiten	Tage/Jahr	320	320
	Stunden/Tag	24	24
Spezifischer Brennstoffverbrauch (Erfahrungswert)	kcal/kg Klinker	800	800

BESTEHENDE DATEN FÜR FOSSILEN BRENNSTOFF (KOHLE):			
Heizwert	kcal/kg	7.000	7.000
Brennstoffverbrauch	kg/Std.	9.714	6.800
Brennstoff-Preis (Marktreferenz Jahr 2014)	EUR/Tonne	83	83
→ (1) Aktuelle Kosten für fossilen Brennstoff:	EUR/Jahr	6.192.274	4.334.592

NEUE DATEN ZUM ERSATZBRENNSTOFF:			
Heizwert	kcal/kg	-	5.000
Benötigte Ersatzbrennstoff-Mengen kalkuliert:	Tonnen/Std.	-	4
	Tonnen/Tag	-	98
	Tonnen/Jahr	-	31.334
Anschaffungskosten für Ersatzbrennstoff (extern aufbereitet):	EUR/Tonne	-	30
→ (2) Kosten für Ersatzbrennstoff:	EUR/Jahr	-	940.032

→ (1)+(2) Kombinierte Brennstoffkosten:	EUR/Jahr	6.192.274	5.274.624
---	----------	-----------	-----------

FINANZIERUNGSKOSTEN			
Anschaffungssumme K_0 (Kredit)	EUR	-	2.000.000
Kreditlaufzeit n	Jahre	-	10
Zinssatz i	%	-	3,0
Jährliche, gleichbleibende Rückzahlungsrate	EUR/Jahr	-	268.783
Summe Zinsen am Ende der Laufzeit n	EUR	-	687.833
→ Gesamt-Finanzierungskosten (=Endwert K_n):	EUR	-	2.687.833

Fortsetzung...

	Einheit		
Thermische Substitutionsrate	%	0	30

BETRIEBSKOSTEN			
Zusätzlicher Personalbedarf (falls notwendig)	Stk.	-	2
Durchschnittskosten für EU-Arbeitskraft inkl. Lohnnebenkosten (Quelle: Destatis Eurostatdaten 2012):	EUR/Monat	-	2.000
→ (3) Personalkosten:	EUR/Jahr	-	48.000
Angenommene Wartungskosten (% von Investitionssumme) (a):	%	-	2
Angenommene Kosten für Ersatz-, Verschleißteile und Schmierstoff (b)	EUR/Jahr	-	25.000
→ (4) Wartungskosten (a)+(b):	EUR/Jahr	-	65.000
Angenommene Versicherungskosten (% von Investitionssumme):	%	-	2
→ (5) Versicherungskosten:	EUR/Jahr	-	40.000

→ (3)+(4)+(5) Fix-Kosten:	EUR/Jahr	-	153.000
----------------------------------	----------	---	---------

Betriebszeiten:	Stunden/Jahr	-	7.680
Elektrizitätskosten:	EUR/kWh	-	0,07
Installierte elektrische Leistung der EBS-Anlage:	kW	-	200
Nutzungsgrad der installierten Anlage:	%	-	80
→ (6) Gesamt-Elektrizitätskosten für EBS-Anlage:	Stunden/Jahr	-	86.016
Angenommene Rückstellungskosten (% von Investitionssumme):	%	-	2
→ (7) Rückstellungskosten (z.B. Reklamationen):	EUR/Jahr	-	40.000

→ (6)+(7) Variable Kosten:	EUR/Jahr	-	126.016
-----------------------------------	----------	---	---------

→ Summe Betriebskosten (Fix+Variabel):	EUR/Jahr	-	279.016
---	----------	---	---------

KOSTENERSPARNIS (abzgl. Betriebskosten)			
Brennstoffkosten-Einsparung durch EBS-Substitution:	EUR/Jahr	-	638.634
	%	-	70

9.5 Tabellarische Betrachtung der wirtschaftlichen Kennzahlen

AMORTISATIONENZEIT

	Einheit		
Thermische Substitutionsrate	%	0	30

Finanzierungskosten a_0 (=Endwert K_n)	EUR	-	2.687.833
Nutzungsdauer n der neuen EBS-Anlage	Jahre	-	20
Restwert R_w am Ende der Nutzungsdauer n (Annahme)	%	-	15
Restwert R_w	EUR	-	403.175
Kapitaleinsatz (= Finanzierungskosten a_0 - Restwert R_w)	EUR	-	2.284.658
Lineare Abschreibungskosten A_{fa} (= Kapitaleinsatz / Nutzungsdauer)	EUR	-	114.233
→ Amortisationszeit (Pay-Back-Periode):	Jahre	-	3,0

KOSTENWIRTSCHAFTLICHKEIT

	Einheit		
Thermische Substitutionsrate	%	0	30

Nach 2 Jahren	-	-	1,06
Nach 5 Jahren	-	-	1,06
Nach 10 Jahren	-	-	1,06

Ergebnis: Die Investition ist kostenwirtschaftlich, da sie >1 ist.

KOSTENRENTABILITÄT

	Einheit		
Thermische Substitutionsrate	%	0	30

Nach 2 Jahren	-	-	1,68
Nach 5 Jahren	-	-	1,68
Nach 10 Jahren	-	-	1,68

Ergebnis: Die Investition ist kostenrentabel, da das Verhältnis zwischen Gewinn und eingesetztem Kapital positiv ist (>1).

10 Fazit

10.1 Wichtige technische Erkenntnisse

Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit werden nachfolgend aufgelistet:

- Die allgemeine Substitutionsrate der Ersatzbrennstoffe hat sich aufgrund der zwingenden Senkungen der Energiekosten in den letzten zwei Jahrzehnten signifikant erhöht.
- Die meistverwendeten Ersatzbrennstoffe sind Brennstoffe sind Altreifen, Kunststoffabfälle, Tiermehl sowie Industrie- und Siedlungsabfälle
- Die physikalischen (z.B. Korngröße, Feuchtigkeit) und chemischen (z.B. Schwefel, Chlor, Schwermetalle) Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe unterscheiden sich oft wesentlich von fossilen Brennstoffen. Diesbezüglich sind die Anwendungstechniken und Verbrennungsmechanismen entsprechend anzupassen.
- Höhere Konzentrationsmengen bestimmter chemischer Elemente (z.B. Chlor) können Betriebsinstabilitäten verursachen und in bestimmten Fällen (z.B. Schwermetalle) die Zementqualität negativ beeinflussen.
- Das Emissionsverhalten scheint keinen negativen Effekt zu haben – ganz im Gegenteil – die Verbrennung von Ersatzbrennstoffen hat einen positiven Effekt auf die Umweltemissionen.

10.2 Kritische Betrachtung

Trotz intensiver Forschungsarbeit und enormer Entwicklungsschritten gibt es noch immer keine internationale Standardisierung in Hinblick auf die Qualitätsmerkmale der Ersatzbrennstoffe (Heizwerte, Feuchtigkeit, flüchtige Bestandteile usw.), damit sie in vordefinierten Brennprozessen einwandfrei angewendet werden können. Die besagte Qualität dient lediglich als Vergleichswert zum ersetzenden fossilen Brennstoff, wobei die Einsatzmengen dem bereits untersuchten Heizwert angepasst werden müssen¹¹³.

Eine Standardisierung würde nicht nur sicherstellen, dass ein Zementwerk die gewünschte und konstante Qualität bekommt, sondern auch die konstruktive Auslegung neuer Anlagen unheimlich erleichtern.

¹¹³ Vgl. Denizeau, Stoerker, Demirtas, Landais, Shah, de Robert, Desseix, Hamm, Mc Quillan: Fuel Flexibility Study, S. 8

Heutzutage sind die Anlagenbauer oftmals damit konfrontiert, für ihre technischen Lösungen zu garantieren, wobei die oft fluktuierenden Brennstoffqualitäten einen erheblichen Einfluss auf die verfahrenstechnische Lösung haben und somit das Ergebnis nicht vorhersehbar ist.

10.3 Künftige Trends

Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen hat sich aktuell in einigen Weltregionen durch den überraschend anhaltenden Ölpreisrückgang sogar verlangsamt, was zu einem plötzlichem Verbrauchsanstieg traditioneller, fossiler Energieträger geführt hat.

Ganz anders funktioniert die Regelung in Österreich, die durch das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) die Wiederverwendung von Abfällen verlangt und forciert, anstatt sie auf die Deponien zu führen. Dies wird nicht nur durch den Staat finanziell subventioniert, sondern bei Missachtung sogar gesetzlich bestraft. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die österreichische Zementindustrie keinen wesentlichen Rückgang des Ersatzbrennstoffeinsatzes erleiden wird, auch wenn die derzeitigen Ölpreise attraktiv erscheinen¹¹⁴.

Auch seitens der Europäischen Union gibt es einen weiteren Trend zur Verbesserung der europäischen Abfallwirtschaft, in der trotz kontinuierlicher Fortschritte noch immer große Mengen an potenziellen Sekundärrohstoffen und damit verbundenen wertvollen Ressourcen verloren gehen.

Das wichtigste Ziel dieses europaweiten Vorstoßes ist es, sicherzustellen, dass Wertstoffe, die im Abfall enthalten sind, effektiv wiederverwendet, recycelt und wieder der europäischen Wirtschaft zugeführt werden. Der Übergang zur sogenannten Kreislaufwirtschaft (Englisch: circular economy) hat es zum Ziel, den Abfall als Ressource zu sehen und durch die Förderungen neue Chancen und Arbeitsplätze entstehen zu lassen¹¹⁵.

¹¹⁴ Vgl. Sounders, Edwards: Global Cement Magazine; Global CemFuels focus Austria and Germany, S. 12

¹¹⁵ Vgl. Europäische Kommission: Arbeitsunterlage der Europäischen Kommissionsdienststellen SWD(2014) 208, S. 2-4

Der konkrete Vorschlag der Europäischen Kommission ist darauf ausgerichtet, dass bis zum Jahr 2030, 70% der Siedlungsabfälle bzw. 80% des Verpackungsmaterials durch Recycling wieder gewonnen und in diversen Produktionsprozessen wiederverwendet werden¹¹⁶. Dies bezieht sich sehr wohl auch auf die weitere Forcierung der Ersatzbrennstoff-Produktion und deren Anwendung in der Zementindustrie als wichtiger Energieträger.

Mit diesem Beitrag zum Umweltschutz soll nicht nur der Profit, sondern auch die damit verbundene Technologie und Innovation gesteigert werden. Um diese Zielvorgaben realistisch erfüllen zu können, werden allen einzelnen Mitgliedsstaaten eigene Fristen, in Abhängigkeit von ihrem aktuellen infrastrukturellen Status, definiert.

Das Ziel dieser Arbeit war es, abgesehen vom wirtschaftlichen Nutzen, auch ein besseres Verständnis über die Anwendungsmechanismen von Ersatzbrennstoffen darzustellen. Zu diesem Zweck habe ich diverse Fachbücher verwendet, aus denen die wichtigsten praktischen Untersuchungsergebnisse und Fakten angeführt wurden.

Außerdem weise ich auf die Themen Umweltschutz und insbesondere moderne Abfallwirtschaft hin, die mit den Ersatzbrennstoffen in indirekter Verbindung stehen und somit einen wichtigen Beitrag zur Müllbeseitigung und dem Wohlergehen leisten.

Durch das empirisch ermittelte Beispiel einer Entscheidungsinvestitionsmethode und der darauf folgenden dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung habe ich den Weg der wirtschaftlich mittelfristigen Rechtfertigung dieser oft kostenintensiven Investitionen untersucht.

Letztendlich konnte ich durch diese Arbeit einen Sammelkatalog über die notwendigen Schritte, Maßnahmen aber auch die Risiken in der Anwendung von Ersatzbrennstoffen zusammenzufassen. Die daraus gewonnenen theoretischen und praktischen Erkenntnisse werden mir im weiteren Berufsleben auf jeden Fall behilflich sein.

¹¹⁶ Vgl. HRT (Hrvatska Radio Televizija): Paralele : Europski magazin. - HRT. 13.02.2015, 21:10 Uhr (Sendung Nr. 236). - Fernsehbericht

Literaturverzeichnis

Larsen, Morten Boberg: Alternative Fuels in cement production : Technical University of Denmark. - 1. Aufl. - Copenhagen : Verlag Book Partner Norhaven Digital, 2007

Lechtenberg, Dirk; Diller, Hansjörg: Alternative Fuels and Raw Materials : Handbook for the cement and lime industry. - 1. Aufl. - Düsseldorf : Verlag Bau+Technik GmbH, 2012

Denizeau, Jacques ; Stoerker, Mark ; Demirtas, Alaattin ; Landais, Christophe ; Shah, Pritesh ; de Robert, Bruno ; Desseix, Julie ; Hamm, Andreas ; Mc Quillan, Bob: Fuel Flexibility Study : Lafarge Cement Technical Agenda. - 1 Aufl. - St. Quentin : Direction des Performances Cimentieres, 2005

Döring, Stefan: Pellets als Energieträger : Technologie und Anwendung. - 1. Aufl. - Berlin : Springer Verlag, 2011

Nagel, Janet: Nachhaltige Verfahrenstechnik : Grundlagen, Techniken, Verfahren und Berechnung. - München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2015

Kurzweil, Peter ; Frenzel, Bernhard ; Gebhard, Florian: Physik-Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. - 1. Aufl. - Wiesbaden : Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2008

Kurzweil, Peter: Chemie : Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente. - 10. Aufl. - Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2015

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Zement-Taschenbuch. - 51. Aufl. - Düsseldorf : Verlag Bau+Technik GmbH, 2008

Alsop, Philip ; Chen, Hung ; Tseng, Herman: Cement Plant Operations Handbook for Dry-Process Plants. - 5. Aufl. - Dorking : Verlag David Hargreaves, International Cement Review, 2007

Voegele, Arno ; Sommer, Lutz: Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure : Kostenmanagement im Engineering. - 1. Aufl. - München : Carl Hanser Verlag, 2012

Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ): Zement trägt Verantwortung : Nachhaltigkeitsbericht 2014. - Wien : Friedrich VDV Vereinigte Druckereien und Verlags GmbH & Co KG, 2015

Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ): Zementerzeugung in Österreich. - Wien : Betonmarketing Österreich, 2012

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess : Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen : Technischer Bericht A-2015/0117-2. - Düsseldorf : VDZ GmbH, 2015

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Zementindustrie im Überblick 2013. - Berlin : VDZ GmbH, 2013

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Zementindustrie im Überblick 2015. - Berlin : VDZ GmbH, 2015

Hackl, Albert ; Mauschitz, Gerd: Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie V : Berichtszeitraum 2003-2005. - Wien : 2007

Rahman, Azad ; Rasul, M.G. ; Khan, M.M.K. ; Sharma, S.: Recent development in the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. In: Fuel : The Science and Technology of Fuel and Energy April 2015, Nr. 145, S. 84-99 - ISSN: 0016-2361

Böhmer, Siegmund ; Kügler, Ingo ; Stoiber, Helga ; Walter, Birgit: Abfallverbrennung in Österreich : Statusbericht 2006. - Wien : Bundesumweltamt, 2007

DVO 2008 (idF v. BGBl. II Nr. 455/2011) § 6 Abs. 1b, § 6 Abs. 2, § 7 Abs. 7f.
Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien

Saunders, Edwards: Global CemFuel focus : Austria and Germany. In: Global Cement Magazine : Februar 2015, S. 8-15. - ISSN 1473-7940

Neubauer, Christian ; Walter, Birgit: Behandlung von gemischten Siedlungs- und Gewerbefällen in Österreich : Betrachtungszeitraum 2003 bis 2007. - Wien : Bundesumweltamt, 2009

Miljković, Marijana: Neue Wege für Kroatiens Müll. In: Wirtschaftsblatt Österreich. 08.01.2014. URL: <http://www.psr-institut.at/wp/wp-content/uploads/2014/02/wirtschaftsblatt_neue-wege-f%C3%BCr-kroatiens-m%C3%BCll.pdf>, verfügbar am 23.11.2015

Schöffmann, Harald: Gas-Bypass-Anlagen zur Beherrschung von Chlorid-Kreisläufen im Zementwerk. – Leoben : 2003

Europäische Kommission: Arbeitsunterlage der Europäischen Kommissionsdienststellen : Zusammenfassung der Folgenabschätzung : Dokument-Nr. SWD(2014) 208. - Brüssel: Europäische Kommission, 02.07.2014

HRT (Hrvatska Radio Televizija): Paralele : Europski magazin. - HRT. 13.02.2015, 21:10 Uhr (Sendung Nr. 236). - Fernsehbericht

Woltron, Günter: ATEC Training Fuels and Combustion. 18.06.2007. – firmeninterne Schulungsunterlagen

Jensen, Lars Skaarup: F.L. Smidth calciner concept : difficult fuels – low emissions. – 29.06.2008. – Fachpräsentation

Workman A.J.: Redler – Schenck Process Group : IntraBulk - Bulk Reception Unit. – Oktober 2010. - Fachpräsentation

Stelling, Johannes: Vorlesungsskript Planungs- und Entscheidungsmethoden : Semester 3. - Hochschule Mittweida, 18.04.2013

Ertl, Harald: Vorlesungsunterlagen Investitionswirtschaft : Semester 1. - Hochschule Mittweida, 25.02.2014

Internet:

EUR-Lex - 31999L0031 – EN - EUR-Lex. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>, verfügbar am 02.11.2015

EUR-Lex – 32008L0001 – EN - EUR-Lex. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32008L0001>, verfügbar am 17.11.2015

USP: Abfallinformation. URL:

https://www.usp.gv.at/Portal.Node/usp/public/content/umwelt_und_verkehr/pflichten_abfallerzeuger/abfallinformation/36399.html, verfügbar am 10.11.2015

Leachate Water at the Puerto Vallarta Landfill Site to be Treated. URL:

<http://www.vallartadaily.com/leachate-water-puerto-vallarta-landfill-site-treated>, verfügbar am 23.11.2015 (nur das Bild)

Environmental Problem - Environmental Geography. URL:

<https://environmentalgeography.wordpress.com/2011/08/31/environmental-problem>, verfügbar am 23.11.2015 (nur das Bild)

Schüttgutverkehr mit Schubboden (Walkingfloor) – Transporte Raum München / Bayern TREN-CARGO GmbH. URL: <http://www.tren-cargo.de/de/infos/schuettgutverkehr-mit-schubboden.html>, verfügbar am 12.11.2015 (nur das Bild)

Vollmar Frachtvermittlung & Logistik GmbH. URL: <http://www.vollmar-logistik.de/deutsch/286/213/213/998313/design8.html>, verfügbar am 12.11.2015
(nur das Bild)

Presse – Entsorgung – Kärnten. URL: http://www.kab.co.at/aut_de_html-5-unternehmen.php?pageld=presse-6, verfügbar am 21.12.2015

Bundeskanzleramt RIS Informationsangebote. URL: <https://www.ris.bka.gv.at>, verfügbar am 17.11.2015

Sintern – Wikipedia. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sintern>, verfügbar am 23.11.2015

Zementsorten, -bezeichnungen/Normen – VÖZ Vereinigung Österreichischer Zementindustrie. URL: <http://www.zement.at/zement/zement/zementsorten-bezeichnungennormen>, verfügbar am 23.11.2015

RAL-Gütezeichen.de. URL: <http://www.ral-gutezeichen.de/gutezeichen-einzelanzeige.html>, verfügbar am 23.11.2015

ThermoTeam – Energie aus Abfall – Ein gemeinsames Unternehmen von Saubermacher und Lafarge Perlmooser. URL: http://www.thermoteam.at/cms/front_content.php?idart=3&idcat=4&lang=1, verfügbar am 27.11.2015

URL: <http://www.leat.ruhr-uni-bochum.de/deutsch/Forschung/bslabor.htm>, verfügbar am 24.11.2015

URL: <http://www.chemie.de/lexikon/Stickoxide.html>, verfügbar am 25.11.2015

Thermische Behandlung von Abfällen, BMLFUW. URL: <http://www.bmlfuw.gv.at/greentec/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-thermisch/Abfallverbrennung.html>, verfügbar am 27.11.2015

Umwelt: w&p Zement GmbH. URL: <http://www.zement.wup.at/746.0.html>, verfügbar am 25.11.2015

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere dass ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen sind, durch Zitate als solche gekennzeichnet habe. Weiterhin erkläre ich, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

Ich versichere, dass die von mir eingereichte schriftliche Version mit der digitalen Version der Arbeit übereinstimmt.

Ferlach, den 22.01.2016

(Sanel Karahmet)